

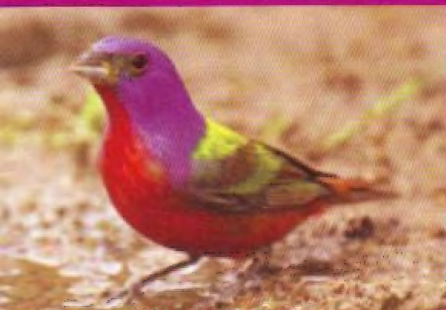
المجلد 22 - العدد 10  
أكتوبر (تشرين الأول) 2006

SCIENTIFIC  
AMERICAN

October 2006

# مجلة العلوم

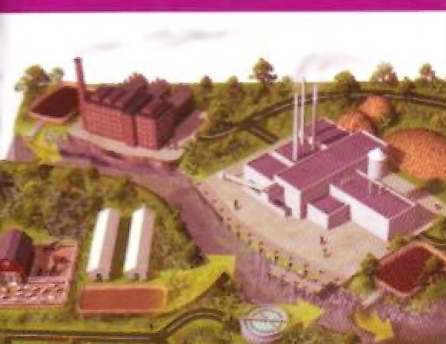
الترجمة العربية لمجلة ساينتيفيك أمريكان  
تصدر شهرياً في دولة الكويت عن  
مؤسسة الكويت للتقدم العلمي



رؤية الطيور للألوان



طاقة لدفع طائرة فضائية



جزيئات خضراء (صديقة للبيئة)



نحو سيطرة أفضل على الألم



جينومات للجميع

العدد 222 - (السعر: 1.000 دينار كويتي)



«مجلة العلوم» تصدر شهرياً في الكويت منذ عام 1986 عن «مؤسسة الكويت للتقدم العلمي» وهي مؤسسة أهلية ذات نفع عام، يرأس مجلس إدارتها صاحب السمو أمير دولة الكويت، وقد أنشئت عام 1976 بهدف المعاونة في التطور العلمي والحضاري في دولة الكويت والوطن العربي، وذلك من خلال دعم الأنشطة العلمية والاجتماعية والثقافية. ومجلة العلوم هي في ثلاثة أرباع محتوياتها ترجمة لـ «ساينتيك أمريكان» التي تعتبر من أهم المجالات العلمية في عالم اليوم. وتسعى هذه المجلة منذ نشأتها عام 1986 إلى تمكين القارئ، غير المتخصص من متابعة تطورات معارف عصره العلمية والتقنية، وتوفير معرفة شمولية للقارئ، المتخصص حول موضوع تخصصه. تصدر «ساينتيك أمريكان» بشان عشرة لغة عالمية، وتتميز بعرضها الشيق للمواد العلمية المتقدمة وباستخدامها القيم للصور والرسوم الملونة والجداول

### مخاطر ازدياد حموضة مياه المحيطات

فؤاد العجل - عبد القادر عابد

<C.S. دوني>



38

تمتص مياه المحيطات الكربون المنبعث من احتراق الوقود الأحفوري، حيث يغير التوازن الحمضي لمياه البحر؛ وقد يكون تأثير هذا التغير في الحياة البحرية كبيراً جداً.

### جزيئات خضراء (صديقة للبيئة)

غدير زيزفون - ابتسام حمد

<J.T. كوليز> - <Ch. والتر>



46

فئة جديدة من الحفازات تستطيع تدمير بعض أسوأ الملوثات الكيميائية العضوية قبل أن تؤذي البيئة.

### طاقة لدفع طائرة فضائية

محمد دبس - خضر الأحمد

<A.Th. جاكسون>



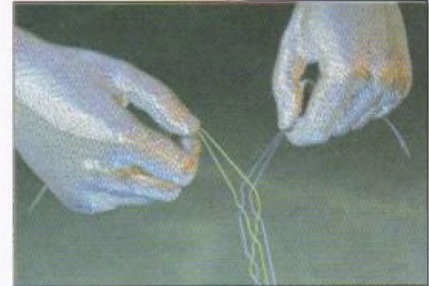
54

إن ابتكار محرك نفث فوق صوتي متطور قادر على دفع طائرة فضائية إلى مدارها بطريقة روتينية وبتكلفة معقولة، هي مهمة صعبة لكن على ما يبدو يمكن إنجازها.

### حوسبة بالعقد الكمومية

حاتم النجدي - عدنان الحموي

<P.G. كولنز>



62

قد يكون أفضل سبيل لجعل الحوسبة الكمومية عملية هو عمل صفائف من المسارات الرُمكانية التي تسلكها جسيمات غريبة تسمى أيونات.

### 72 أخبار علمية

التهابات الجسم.

### 70 معرفة عملية

استخدام متزايد للاستنثات (الوشائج) الطبية.



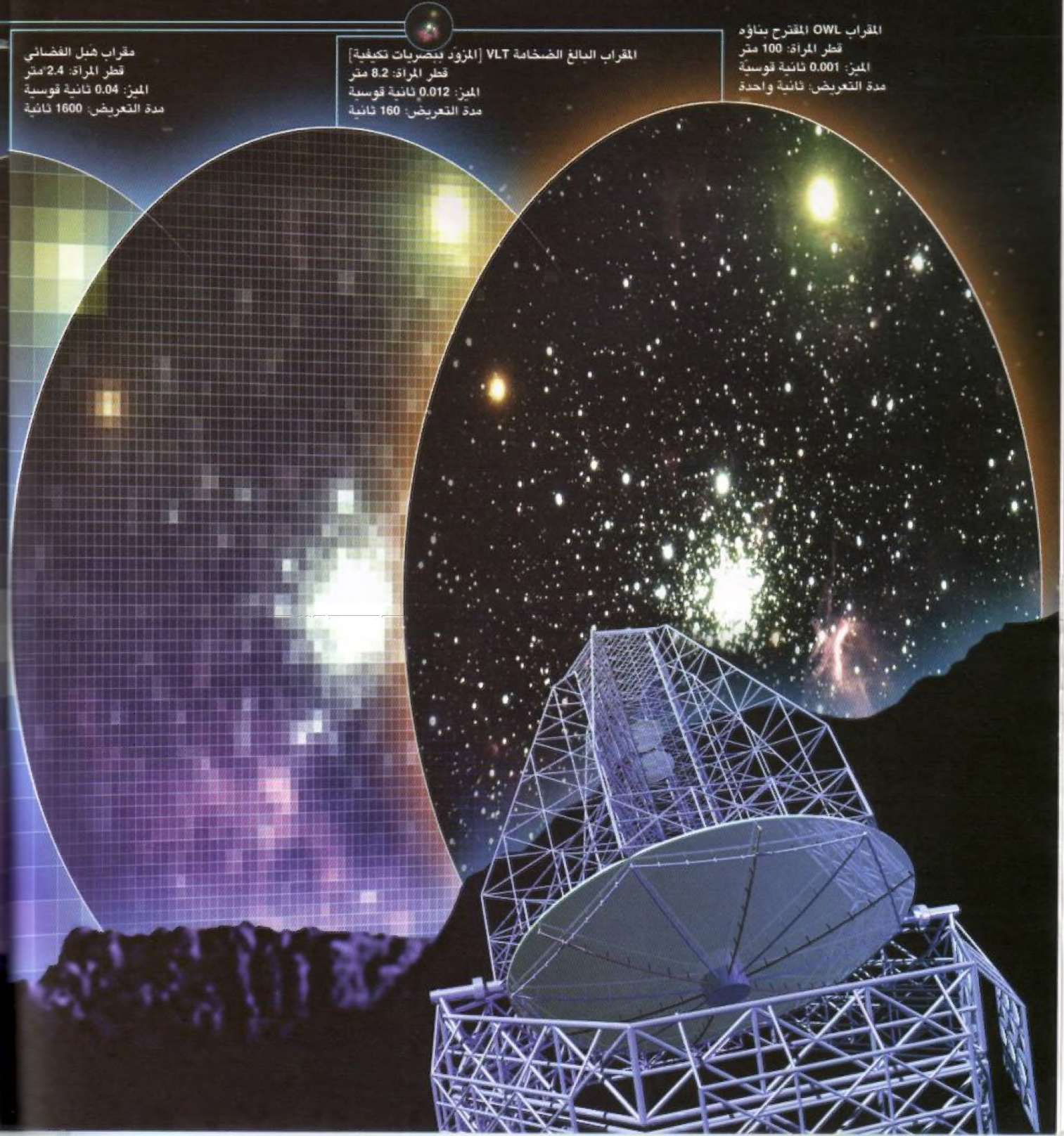
# مقاريب المستقبل العملاقة<sup>(\*)</sup>

<R> كيلومتري

مقرب هبل الفضائي  
قطر المرآة: 2.4 متر  
الحيز: 0.04 ثانية قوسية  
مدة التعريض: 1600 ثانية

المقرب البالغ الضخامة VLT [المزود ببصريات تكيفية]  
قطر المرآة: 8.2 متر  
الحيز: 0.012 ثانية قوسية  
مدة التعريض: 160 ثانية

المقرب OWL المقترح بناؤه  
قطر المرآة: 100 متر  
الحيز: 0.001 ثانية قوسية  
مدة التعريض: ثانية واحدة





يفيد المدلول الفلكي لقانون مور Moore أن حجم المقاريب يتضاعف كل بضعة عقود. لكن المصممين في هذه الأيام يعتقدون أن بمقدورهم بناء مقارب أكبر ثلاث أو أربع، أو حتى عشر مرات، خلال عقد واحد من الزمن.

بعض أحسن أوقاتي، في مرصد بارنال<sup>(١)</sup> بجمهورية تشيلي، أمضيها ليلاً، وذلك عندما أذهب بعد يوم من العمل إلى ما نسميه «السطح العلوي»، وهو المنصة التي تحتضن المقاريب الأربعة التي يبلغ قطر الواحد منها ثمانية أمتار، والتي يتألف منها مشروع المقارب البالغ الضخامة Very Large Telescope (VLT). فكل شيء هناك ساحر خلّاب: الامتداد الواسع للسماء النجمية والحركات السلسة للقباب والمتعة غير المستحبة التي تغمرني عندما أدخل غليوني والصحراء المظلمة التي يصعب رؤية حدودها مع الأفق بسبب سطوعه الضعيف. وخلال وقوفي هناك متأملاً بإعجاب المقارب VLT - أكثر مجموعة من المقاريب تطوراً في العالم - ومتمتعاً بمنظر الآلة الأربعة التي تزن 430 طناً، وتدور بهدوء وكأنها تؤدي مع السماوات رقصة باليه معقدة، كنت أفكر ملياً في حظي السعيد الذي ساقني إلى العمل في مثل هذا المشروع الرائع. وإنه لإنجاز باهر أن تشارك البشرية كلها بالإسهام فيه. وكما هي الحال في جميع المقاريب الضخمة الأخرى الموجودة في أيامنا هذه، مثل مرصد كيك Keck Observatory ومقارب هبل الفضائي Hubble Space Telescope والمقارب Very Large Array، يشتمل المقارب VLT على أعلى التقنيات التي نعين على حضارتنا إبداعها. وإذا تحرّيت أصل كل جزء من المشروع، توصلت إلى أن إنجازَه تطلب، في النهاية، جهود ملايين من الناس.

لكن الفلكيين لا يكلّون ولا يملّون. فما إن اكتمل بناء المقارب VLT، حتى شرع كثير منا في التفكير بمقاريب تخلفه، تراوح أقطار مرآياتها الأولية ما بين 25 و 30 متراً، أو حتى 100 متر. وإحدى الأفكار التي كانت تدور في ذهني تصميم مقارب أسطوري اسمه OWL (وهذه الأحرف الثلاثة هي الأحرف المائلة في الكلمتين Over Whelmingly Large، أي «كبير بقدر هائل»)، يسمح برصد ليلى رائع، وتماًلاً مراته الضخمة، التي قطرها 100 متر، السطح العلوي كله تقريباً لمرصد بارنال.

وكما هي الحال في جميع الآلات العلمية

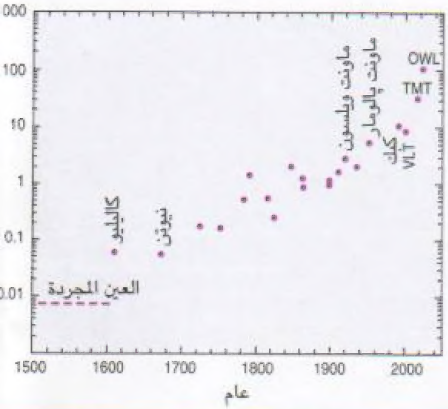
مقارب البالغ الضخامة (VLT) [بدون بصريات تكيفية]  
قطر المرآة: 8.2 متر  
الميل: 0.4 ثانية قوسية  
مدة التعريض: 620 ثانية

من لطخة غير واضحة إلى معلّم واضح: يحظى مقارب ضخّم مزوّد ببصريات تكيفية، برؤية أكثر حدة من رؤية حتى مقارب هبل الفضائي [تستند هذه المحاكاة إلى صورة المقارب VLT للضوء تحت الأحمر القريب الصادر عن منطقة التكون النجمي NGC 3603].

THE GIANT TELESCOPES OF THE FUTURE (١٠)  
Paranal Observatory (١)



ستواصل المقاريب المقترح بناؤها، مثل OWL و TMT، نزعتها التاريخية إلى زيادة مساحة فتحاتها.



(محرق) موجودة في موقع ملائم يمكنك رؤيته بعينك، أو تأخذ صورة له، أو تحلّكه إلى مجموعة متنوعة واسعة من ألوان التحليل الطيفي. وعندما يتحدث الفلكيون عن حجم مقرب، فهم يقصدون قطر مرآته الأولية. وتسمح لك مضاعفة هذا القطر برؤية أجرام سماوية بالسطوع نفسه، لكن عندما يتضاعف بعدها عنك.

وخلال السنوات الخمسين الأخيرة، صارت المقاريب أشد حساسية للأجسام ذات الضوء الباهت. ولا يعود السبب في ذلك إلى تكبير قطرها فحسب، وإنما أيضا إلى الإنجازات التي تحققت في تقانة المكتشفات detectors. وخلال بناء مقرب هيل، الذي قطره خمسة أمتار، جرى تجهيزه بصفائح فوتوغرافية لا تسجل سوى بضعة أجزاء في المئة من الضوء الساقط عليها. لكن فعالية المكتشفات الإلكترونية في هذه الأيام قريبة من 100 في المئة - وهذا يؤدي إلى تحسن في الحساسية يعادل زيادة في القطر خمس مرات. لذا فإن الجيل الحالي من المقاريب هو في الواقع أكبر من أسلافه 10 مرّات. وكي يقوم الجيل التالي بإنجاز القفزة نفسها، في ظروف لا تسمح إلا بمجال محدود جدا

Overview/ Very, Very Large Telescopes (\*)  
Scope for Improvement (\*\*)  
California progression (1)  
Hooker telescope (2)  
Hale telescope (3)  
twin Keck telescopes (4)

كبر مقاريب الجيل السابق له، وكان الانتقال من جيل إلى الجيل الذي يليه يستغرق عدة عقود. وهذه النزعة إلى تطوير بناء المقاريب توضحها «متتالية كاليفورنيا»<sup>(\*)</sup> الآتية، التي تبين تسلسل بناء المقاريب خلال القرن العشرين: مقرب هوكر<sup>(2)</sup>، المقام على ماونت ولسون، والذي قطره 2.5 متر (1917)، مقرب هيل<sup>(3)</sup> الذي بُني على ماونت بالومار، والذي قطره خمسة أمتار (1948)، مقربا كيك<sup>(4)</sup> التوأمان المقامان على ماونت ولسون في ماونت كيا بجزيرة هاواي (1993). بعد هذا المقرب، يجب أن يكون قطر مقرب الجيل التالي نحو 20 مترا، وأن يبدأ عمله عام 2025 تقريبا. تُرى، هل هؤلاء الذين يقترحون معنا بناء مقاريب تراوح أقطارها ما بين 25 مترا و100 متر بحلول منتصف العقد القادم قد فقدوا رشدهم؟ إن إلقاء نظرة عن كثب على تحديات بناء مقرب قد يجعلك تؤمن بسلامة عقول هؤلاء الفلكيين. فبناء مرصد أرضي ضخم ضروري لا لأن الحاجة إليه ملحة فحسب، وإنما أيضا لأن معظم التقانات اللازمة لإنشائه متوافرة.

### مدى التحسينات<sup>(\*\*)</sup>

يتجلى الدافع القوي لتحدي قانون مور فيما يخص المقاريب في أنه لم يعد لدى الفلكيين من خيارات لتحسين قدرة أجهزتهم الحالية على تجميع الضوء. ففي مقرب عاكس، يرتد الضوء أولا عن مرآة أولية، ثم يصطدم بمرآة ثانوية لتجمعه في بؤرة

الجديدة، فإن المقاريب العاملة في هذه الأيام، التي قياس أقطارها يراوح ما بين 8 و 10 أمتار، لا تقتصر على تقديم إجابات عن الأسئلة التي بنيت من أجلها، إنما أيضا تطرح أسئلة جديدة أكثر عمقا وتحديا تتطلب معالجتها آلات أكبر. فتحليل تركيب الكواكب الشبيهة بالأرض في منظومة نجمية أخرى؛ والبحث عن آثار للحياة عليها؛ ودراسة أولى المجرات التي نشأت في الكون؛ وفهم طبيعة المادة العاتمة والطاقة العاتمة؛ وتصوير حشود الأجسام في منظومتنا الشمسية التي تقوم السفن الفضائية بدراساتها - كل هذا يدفع الفلكيين إلى التفكير في جيل من المقاريب الضوئية العملاقة التي تتجاوز قدراتها قدرات المقاريب المتوافرة في هذه الأيام بمئات أو آلاف المرات. وقد ارتأت وكالات أوروبية مختلفة أن مثل هذه المقاريب تشغل قمة أولويات علم الفلك؛ وترى أكاديمية العلوم الوطنية الأمريكية أنه لا يعلو على هذه المقاريب سوى وريث مقرب هبل الفضائي، وهو مقرب جيمس ويب الفضائي James Webb Space Telescope (JWST). ويوجد الآن عدد من المشاريع التي يجري التفكير فيها، ومن ضمنها المقرب OWL ومقرب الثلاثين مترا Thirty Meter Telescope (TMT) ومقرب ماجلان العملاق Giant Magellan Telescope (GMT) الذي قطره 24 مترا.

ومن الناحية التاريخية، خضعت المقاريب للمدلول الفلكي لقانون مور، إذ كان كِبَرُ مقاريب كل جيل منها يُعادل تقريبا ضعف

### نظرة إجمالية/ المقاريب الكبيرة جدا<sup>(\*)</sup>

- الحجم مهم في علم الفلك. فالمقاريب الكبيرة قادرة على كشف أبهت الأجرام السماوية والحصول على صور أشد وضوحا. ولأكبر المقاريب الحالية للضوء المرئي والضوء تحت الأحمر القريب مرآيا أقطارها تراوح ما بين 8 و 10 أمتار. ويعكف الباحثون حاليا على دراسة الجيل التالي من المقاريب التي تمتد أقطارها من 20 مترا إلى عدد أسطوري يصل إلى 100 متر.
- مع أن المقاريب مقامة على الأرض، فستزود بتقانة البصريات التكيفية لتعويض آثار الضبابية التي يحدثها الجو. وفي الحقيقة، ستزودنا هذه المقاريب بصور أوضح كثيرا من تلك التي يوافرها مقرب هبل الفضائي وبتكلفة أقل. وتسمح هذه الآلات الجديدة بإنجاز عدة مهمات تتجاوز قدرات المقاريب الحالية، مثل البحث عن كواكب تدور حول نجوم أخرى، وتحليل تركيب ما تكشفه منها.

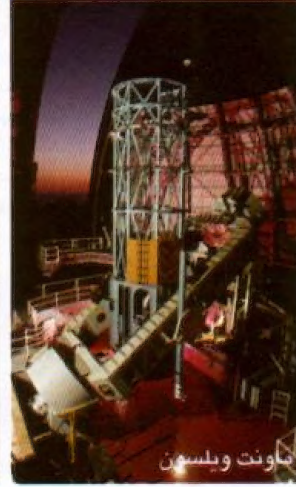




كيك 1



لأونت بالومار



لأونت ويلسون



100  
10  
0  
0.0

بعضها ببعض التصاقا محكما للسطح مجسم القطع الزائد. ولكل من هذه القطع شكل مختلف قليلا، يتوقف على بعد القطعة عن مركز المرآة. ومن حيث المبدأ، يمكن تكييف تصميمها لتتلاءم مع أي مساحة للمرايا. لكن الوجه السلبي لهذه العملية هو الحاجة إلى رصف القطع بدقة الأطوال الموجية الجزئية، وذلك للتقليل إلى الحد الأدنى من أثر الوصلات في جودة الصورة، وللإبقاء على التصاق جيد للقطع بعضها ببعض على الرغم من الرياح العاتية التي تهب عليها.

وكما هي الحال في مقراب كيك، فإن مقرابي OWL و TMT سيتكوّنان من قطع سداسية الشكل. لكن مصممي مقراب GMT سلكوا طريقا آخر: فبغية تقليل عيوب صنع المرآة من مجموعة من القطع إلى حدها الأدنى، فقد قرروا إنتاج عدد أقل من القطع، لكن بحجم أكبر. وسيكون مقرابهم مكونا من سبع مرايا دائرية قطرها 8.4 متر (أولاهها دخلت مرحلة التصنيع فعلا، وذلك للبرهان على صحة المبدأ الذي ارتضوه)<sup>(٢)</sup>. والسبب في اعتماد هذا الأسلوب هو صعوبة متابعة السير في عملية التكبير شوطا أبعد من ذلك.

هذه المهمة 11 سنة (من ضمنها سنوات الحرب العالمية الثانية)، وخلال تلك المدة، كانت قياسات شكل المرآة تؤخذ كل يومين. ويضبط شكل المرايا في هذه الأيام بتحكم حاسوبي، وهذا يختصر كثيرا من مدة إنجازها. وقد استغرق صقل كل من مرايا VLT الأربع التي قطرها 8.2 متر سنة واحدة، وكانت القياسات تؤخذ دون انقطاع تقريبا، وتعادل جودة سطوحها، أو تتجاوز قليلا، جودة مرآة هيل، مع أن شكلها (مجسم قطع زائد<sup>(٣)</sup>) وهو يحدث أشد تركيز بؤري (ممكن) أكثر تعقيدا بكثير. لذا، لم يعد يمثل الصقل حرجا رئيسيا.

وثمة مشكلة أصعب، هي تصنيع الزجاج نفسه. فبغية صب قطع زجاج قطرها ثمانية أمتار، تعين على صانعي المقراب أن يقيموا معامل خاصة لهذا الغرض، وأن يسلكوا طريقا تجريبيا وعرا، إذ كانوا غالبا يصنعون عدة مرايا ثم يكسرونها قبل توصّلهم إلى المرآة المنشودة. ولا ترقى الإجراءات الحالية إلى بلوغ حتى ضعف الحجم. ولحسن الحظ، فقد قدّم الحلّ الفلكي الإيطالي <H. G> دارتورو عام 1932: إنه المرآة المكوّنة من عدة قطع. وعلى سبيل المثال، فإن مرآتي مقراب كيك التوأمي مكونتان من 36 قطعة، كل منها مسدس قطره 1.8 متر. ويسمح الشكل السداسي لهذه القطع بالتصاق

لأحراز مزيد من التقدم في فاعلية المكشافات، فلا بد أن تكون أقطار المقراب 100 متر.

ومع أن ثمة حوارا وديا، إن صح التعبير، يدور بين مؤيدي التصميمات المختلفة لمقراب المستقبل حول أكبر قطر يمكنهم بلوغه واقعا، فلا يشك أي منهم في الحاجة إلى إعطاء الجيل التالي من المقراب دفعة إضافية في حجمها. وتقليديا، ظل حجم المقراب في التصميمات الجديدة محدودا بالقدرة على إنتاج زجاج مرآوي يمكن صبه ليتخذ الشكل المطلوب، ثم صقله. ولما كان للضوء المرئي طول موجي أقصر من طول الموجات الراديوية، لذا، وعلى الرغم من إمكان جعل الأطباق الراديوية بالغة الضخامة، فإن متطلباتها أقل صرامة بكثير من متطلبات المرايا الضوئية. ولتمثيل هذا الفرق بين المتطلبات نقول إن المحرك الذي تحتاج إليه للتحكم في حمل حبة من الرمل يختلف عن المحرك اللازم لحمل صخرة.

لمقراب هيل الذي قطره خمسة أمتار مرآة لها شكل مجسم القطع المكافئ<sup>(٤)</sup>، ودقة استواء سطحها 50 نانومترا. ولو كانت مساحتها تعادل مساحة مرآة أتلانتيك أوشن<sup>(٥)</sup> لكان ارتفاع أكبر نتوء على سطحها خمسة سنتيمترات. وقد استعمل صانعوها لصقلها أداة صقل خشبية مغطاة بالقار، وفي المراحل الأخيرة من العملية، صقلوا بعض أجزائها يدويا. وقد استغرق إنجاز

A Timeline of Telescopes (+)  
paraboloid (١)  
Atlantic Ocean (٢)  
hyperboloid (٣)

"Breaking the Mold," by W.W. Gibbs; (٤) انظر: Scientific American, December 2005



## رؤية لمقارب من النمط OWL<sup>(\*)</sup>

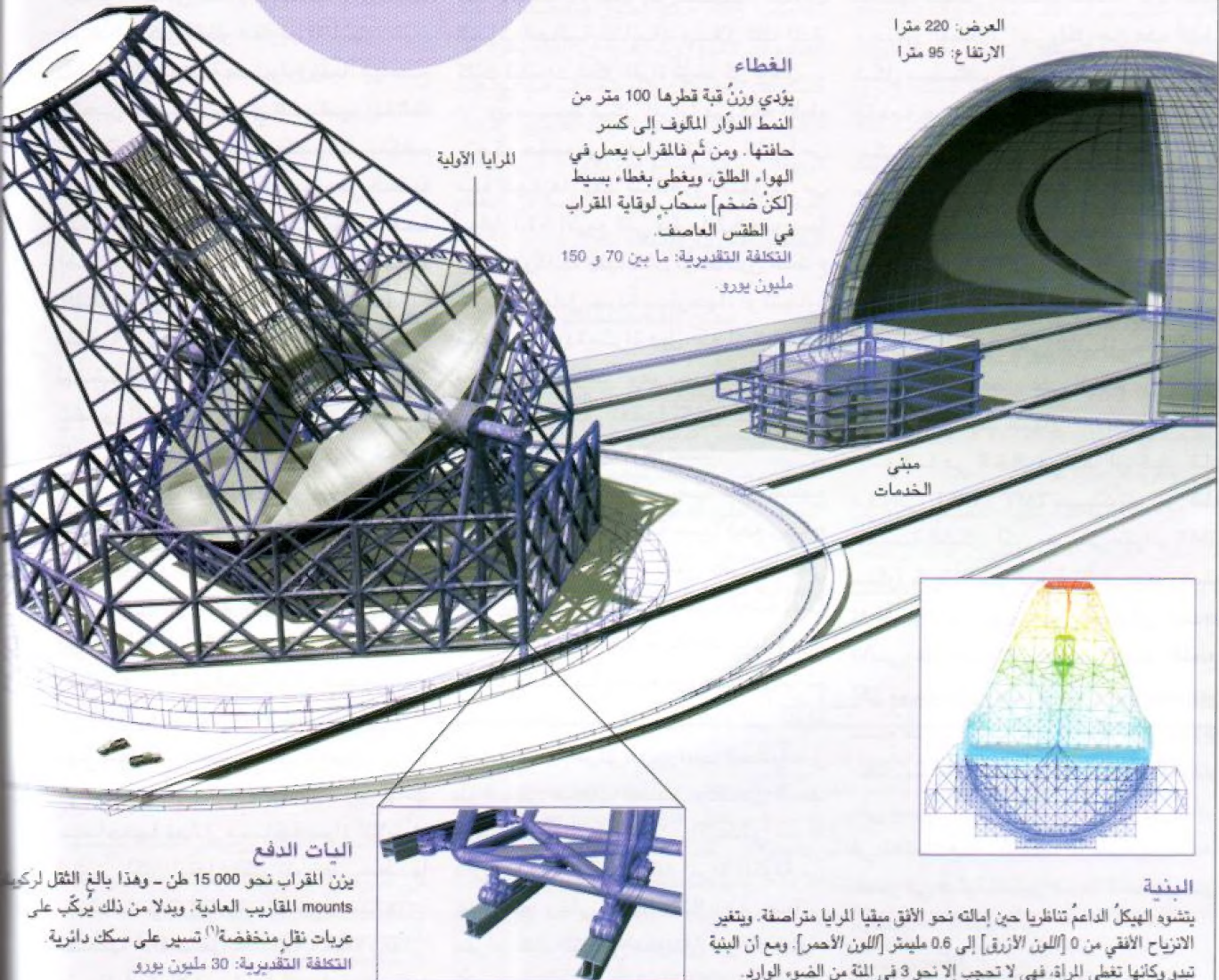
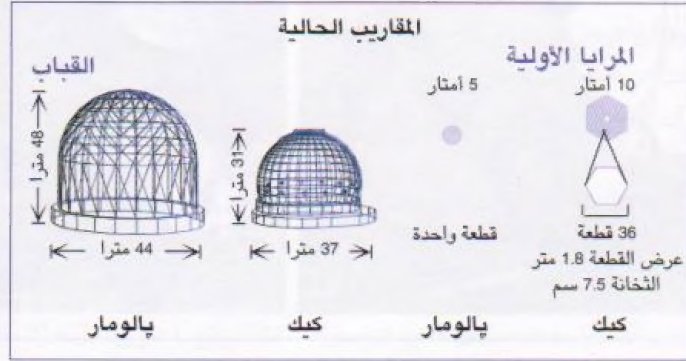
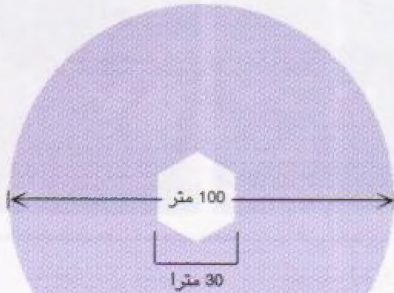
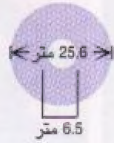
### المرآة الأولية

تتكون المرآة الأولية [التي تُجمع الضوء النجمي] من 3048 قطعة سداسية الشكل وللاقتصاد في النفقات، تغطي هذه القطر سطحاً كروياً بدلاً من مجسمات القطر المكافئة أو الزائدة العادية. التكلفة: 290 مليون يورو.

### المرآة الثانوية

هذه المرآة [التي توجه الضوء النجمي إلى المصحح] مكونة من 216 قطعة. ولتسهيل المتطلبات الميكانيكية، تتخذ المرآة شكلاً مستويًا لا شكلاً منحنياً. التكلفة التقديرية: 30 مليون يورو.

سيكون مقارب حجمه 100 متر أكبر 10 مرات من أي آلة ضوئية كبيرة بُنيت حتى الآن، لكن ثمة عدد من الابتكارات التي ستبقي تكلفته في حدود بليون يورو (1.2 بليون دولار تقريباً) - وهذا مبلغ أقل من تكلفة مقارب فضائي. ويشمل هذا السعر مكشافات وبني تحتية وكذلك أموالاً احتياطية للمصروفات الطارئة.



### الغطاء

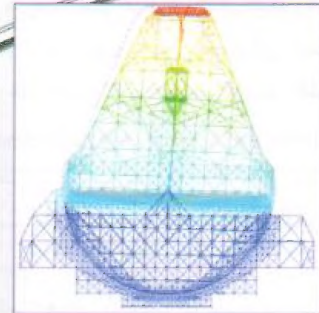
يؤدي وزن قبة قطرها 100 متر من النمط الدوار المائل إلى كسر حافتها. ومن ثم فالمقارب يعمل في الهواء الطلق، ويغطي بغطاء بسيط [لكن ضخم] سحب لوقاية المقارب في الطقس العاصف. التكلفة التقديرية: ما بين 70 و 150 مليون يورو.

### المرايا الأولية

مبنى الخدمات

### آليات الدفع

يزن المقارب نحو 15 000 طن - وهذا بالغ الثقل لركوبه على المقارِب العادية. وبدلاً من ذلك يركب على عربات نقل منخفضة<sup>(\*)</sup> تسير على سكك دائرية التكلفة التقديرية: 30 مليون يورو



### البنية

يتشوه الهيكل الداعم تناظرياً حين إمالاته نحو الأفق مبقياً المرايا مترافعة. ويتغير الانزياح الأفقي من 0 [اللون الأزرق] إلى 0.6 ملليمتر [اللون الأحمر]. ومع أن البنية تبدو وكأنها تغطي المرآة، فهي لا تحجب إلا نحو 3 في المئة من الضوء الوارد. التكلفة التقديرية: 185 مليون يورو.



## البحث عن رؤية<sup>(١)</sup>

ميز عال، يندمج جميع هذه الأجسام معاً. إن اجتماع الميز العالي والحساسية العالية مهم جداً لاكتشاف كواكب شبيهة بالأرض خارج المنظومة الشمسية. ولرؤية هذه الكواكب، التي سطوعها أقل من جزء في البليون من سطوع النجم الذي تدور حوله، يتعين على الفلكيين حجب النجم باستعمال قرص صغير عاتم يُسمى راسم الإكليل<sup>(٢)</sup>. إلا أنه إذا كان هذا القرص كبيراً جداً، حجب الكوكب أيضاً. ويعني الميز العالي أن بمقدور الفلكيين استعمال قرص صغير، وهذا يزيد من عدد الكواكب التي يكتشفونها. وأصغر حجم لمقرب يمكنه مسح مجرتنا بحثاً عن كواكب لها مدارات شبيهة بمدار أرضنا هو 80 متراً تقريباً. وباستطاعة هذا المقرب أن يجري عمليات بحث في رقعة من الفضاء تتضمن نحو 400 منظومة نجمية شبيهة بمنظومتنا الشمسية، وأن يقوم بتحليل طيفي لقريبة 40 كوكباً من الكواكب الشبيهة بالأرض، إن وُجد مثل هذه الكواكب. وللحصول على طيف أي من هذه الكواكب، يتعين على المقرب تجميع الضوء طوال أسابيع، وهذا قد يكون مستحيلاً.

## طور وتكيف<sup>(٣)</sup>

لبلوغ هذا الميز العالي، يجب أن يعتمد المقرب على البصريات التكيفية<sup>(٤)</sup> لإزالة التشوهات التي تحدثها الاضطرابات الجوية. ولتحقيق هذا الغرض تُجرى مراقبة نجم مرجعي (يمكن أن يكون «نجماً» صنعياً يتولد بواسطة إضاءة ليزر في طبقات الجو العليا)، ويُعدّل شكل مرآة أخرى أصغر موضوعة بين المرآة الثانوية والمكشافات. وتقوم مجموعة من المكابس الصغيرة، أو المحفّزات<sup>(٥)</sup>، بدفع القسم الخلفي من المرآة لتعديل شكلها. ويمكن هذا النظام مقرباً من العمل

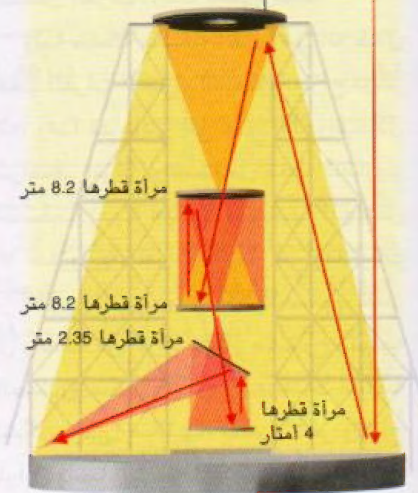
ليست حساسية المقارب للأجسام الباهتة الضوء سوى إحدى المواصفات المنشودة لهذه الآلة. وثمة مواصفة أخرى هي الميز<sup>(٦)</sup>. ومن حيث المبدأ، يجب أن يكون المقرب الكبير قادراً على توفير كلتا المواصفتين. وكلما كبر المقرب، قلّ فساد الصور نتيجة الانعراج<sup>(٧)</sup>، الذي يتسبب في اللطخات<sup>(٨)</sup> التي تحدث عندما تغير الموجة الواردة اتجاه جبهتها بسبب الحافة الخارجية للمرآة. بيد أن الانعراج كان، حتى عهد قريب، مسألة فيها نظر عندما يتعلق الأمر بالمقارب الضوئية المقامة على الأرض. فحتى في أفضل المواقع لبناء المراصد، يجعل اضطراب الهواء أي شيء، انفرجه الزاوي أصغر من 0.3 ثانية قوسية، ضبابياً وغير واضح المعالم. وإذا وُجهت نظرك إلى نجم منكب الجوزاء<sup>(٩)</sup> العملاق (0.05 ثانية قوسية) بواسطة مقرب بالومار، الذي حجمه خمسة أمتار وتكلفته 100 مليون دولار، فكل ما تراه نقطة متألّثة من الضوء الأحمر تبدو أسطح، لكن ليست أوضح، مما يمكن رؤيته بالعين المجردة.

وتعاني المقارب الفضائية مشكلة معاكسة، إذ إنها تقدم صوراً عالية الميز، لكنها تفتقر إلى حساسية رؤية أضعف الأجسام ضوءاً؛ هذا إذا تجاوزنا حقيقة شطرها للضوء إلى عدة ألوان نتيجة تحليلها لمكوناته. لقد حدّد حجم الموك الفضائي قطر مقرب هبل الفضائي بمقدار 2.4 متر، وحتى قطر مرآة المقرب JWST، فستكون 6.5 متر. هذا ويجب إجراء التحليل الطيفي لما تكتشفه السواتل<sup>(١٠)</sup> من الأرض.

هذه المبادلة<sup>(١١)</sup> بين الحساسية والميز شيء غير مستحسن للجيل التالي من المقارب، التي تتطلب أهدافها العلمية تحقّق كليهما في وقت واحد. وخلال تعريض مقرب قطره 100 متر للضوء طوال إحدى الليالي، فسيكون قادراً على رؤية أجرام سماوية سطوعها يعادل جزءاً في الألف من أضعف سطوع رآه الفلكيون حتى الآن. وحيث ترى المقارب الحالية لطفة سوداء في الفضاء، يرى ذلك المقرب حشداً من الأجسام المعتمة، وفي غياب



مرآة ثانوية



## المصحح

بعد إرتداد الضوء عن المرآتين الأولية والثانوية، يدخل إلى المصحح المكون من أربع مرايا صغيرة [غير مبينة في الشكل بالنسبة الحقيقية لقياساتها] مهمتها إزالة تشوهات الصور. التكلفة التقديرية: 55 مليون يورو للمرايا؛ 100 مليون يورو للبصريات التكيفية.

Vision Quest (\*)

Evolve and Adapt (\*\*)

sensors (1)

the resolving power, أي القدرة على تمييز (2)

التفصيلات الدقيقة.

diffraction (3)

star Bebelgouse (4)

trade-off (5)

adaptive optics (6)

blurring ring (4)

satellites (6)

coronagraph (8)

actuators (10)



## مقرب قطر مرآته ثلاثون مترا (TMT)



30 مترا

القطر:

التكلفة التقديرية: 700 مليون دولار

النصميم: مرآة أولية مكونة من عدة قطع

www.tmt.org

موقع الويب:

والعريضة إلى أن تكون أصلب من المقاريب المرتفعة النحيلة، لكنها تتطلب حثي الضوء ليُتَّجه بدقة أعلى إلى البؤرة، وهذا يعقد تصميمها الضوئي. لذا يجب على المهندسين أن يتوصلوا إلى توازن بين المتطلبات الميكانيكية والضوئية. ولا يزال المقرب VLT يهتز إلى حد ما بفعل الرياح، لكن مرآته الثانوية تلغي آثار هذه الاهتزازات بحركتها بالاتجاه المعاكس نحو 70 مرة في الثانية. وسيفعل المقرب OWL الشيء نفسه.

وثمة مشكلة محتملة أخرى هي أنه خلال تعقب المقرب الأجرام السماوية ينزاح مركز ثقله، وهذا قد يؤدي إلى حثي الآلة والإخلال بتراسف المرايا. وتُستعمل معظم المقاريب الضخمة بنية هيكلية صمّمها المهندس M. سيرويه. لمقرب بالومار في الثلاثينات من القرن الماضي. وفي هذا التصميم، تُثبّت كل واحدة من المرايا بإطار مفتوح شبيه بالصندوق مكوّن من أربع دعائم مثلثة الشكل. وحين إمالتها، تنثني الأطر وتنزاح المرايا جانبياً. بيد أنه لما كانت كل مرآة مثبتة بإطار من النمط نفسه، فكلتا المرأتين تنزاحان بالقدر نفسه، وهذا يبقيهما مترافقتين.

Nuts and Bolts (\*)

multiconjugate adaptive optics (1)

"Three-Star Performance," by G.P. Collins, (2)

Scientific American, May 2000

interferometry (3)

"A Sharper View of the Stars," by A.R. Hajian, (4)

J. Th. Armstrong; Scientific American, March 2001

إنجازٌ مميّز أعلى حتى من ميز المقاريب الكبيرة المقترحة<sup>(1)</sup>. وتطوّر هذه التقنية في مرصد بارانال. هذا وإن المقاريب VLT الأربعة مبنية في مواقع تفصل بينها مسافة 130 متراً، ومن ثم يولد دمج ضوءها الميز نفسه الذي يوافره مقرب قطره 130 متراً، وهذا يزودنا بتفصيلات رائعة عن الأجسام التي تدرسها تلك المقاريب. بيد أن لمقاييس التداخل محدوديتها، إذ إنها لا يمكن أن ترصد سوى ساحة صغيرة للرؤية، فاستعمالها يشبه النظر عبر ماصة شراب. يضاف إلى ذلك أن تعقيد أدائها البصرية يجعلها قادرة على استعمال نسبة مئوية صغيرة جداً من الضوء الذي تجمعه، مقابل نسبة 50 في المئة أو أكثر من الضوء الذي تجمعه المقاريب العادية. وفي جميع الأحوال، تعادل المساحة الكلية لتجميع الضوء مجموع مساحات تجميع المقاريب الأربعة فقط. وباختصار، إنها، مثل المقاريب الفضائية، تزيد من ميزها بتخليها عن الحساسية، ومن ثم فهي ليست بديلاً عن مقرب عملاقٍ مقام على الأرض.

## عزقات ومسامير ملولبة<sup>(2)</sup>

لا ينمو الفيل مثل النملة. فازدياد وزن مخلوق يتناسب طردياً مع مكعب زيادة أبعاده الخطية، في حين يتناسب تزايد قدرة الهيكل العظمي على حمل ذلك الوزن طردياً مع المربع فقط لزيادة هذه الأبعاد، ومن ثم فالفيل بحاجة إلى سيقان أضخم كثيراً نسبياً. وما يصح في الثدييات الأرضية الكبيرة يصح أيضاً في المقاريب. فجميع التقانات الضوئية المتقدمة في العالم لا تحظى بأي قيمة تقريباً إذا لم يكن هيكل المقرب قادراً على حمل وزنه. ومع أن الخبراء في علم الفلك الراديوي بنوا أطباقاً قابلة للتوجيه تصل أقطارها إلى 100 متر، فإن المتطلبات الميكانيكية للمقاريب الضوئية أشد قسوة لأنها تعمل بأطوال موجية أقصر كثيراً.

ويجب أن تكون صلابة هيكل المقرب كافية لإبقاء المرايا مترافقة تماماً إحداها مع الأخرى ولمقاومة الاهتزازات التي تحدثها الرياح. وتميل المقاريب القليلة الارتفاع

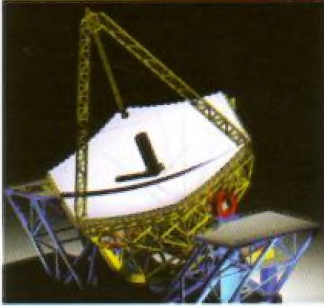
بميزه الأعلى، أو قريباً منه، وكأن الجو غير موجود - ولا يحد من ذلك إلا انحراف الضوء. ويتعين على مقرب قطره 100 متر أن يكون قادراً على رؤية أشياء انحرافها الزاوي 0.001 ثانية قوسية، وهذا أفضل أربعين مرة من قدرة مقرب هبل على رؤية تلك الأشياء. وبواسطة مثل هذا المقرب لا يبدو منكب الجوزاء مجرد نقطة من الضوء، بل صورة ذات 3000 بكسل، مقدّمة مستوى من التفصيل غير متوافر حالياً إلا في الكواكب القريبة.

وتُستعمل هذه التقنية على كثير من المقاريب الكبيرة، بيد أن جعلها تعمل في الأنظمة التي لها حجم أكبر يتطلب تضخيمها. لكن ليس من الواضح البتة أن هذا المطلوب ممكن التحقيق. إن استخدام نظام بصريات تكيفية على مقرب قطره 100 متر يستلزم أكثر من 100 000 مُحفّر. وتجدر الإشارة إلى أن لأنظمة هذه الأيام 1000 مُحفّر على الأكثر. ويتعين على حاسوب التحكم أن يكون قادراً على تغيير شكل هذه المرآة عدة مئات من المرات في الثانية، لكن تقانة المعالجات لم ترق إلى هذا المستوى بعد.

ويسلك المهندسون في هذا الموضوع أسلوب الإنجاز على مراحل، وذلك ببنائهم أولاً أنظمة تعمل بأطوال موجية تحت حمراء، وهذه تحتاج إلى عدد أقل من المحفّرات، لأن شدة أثر الاضطراب تقلّ مع ازدياد الأطوال الموجية. ويجب على المهندسين أيضاً أن تكون لديهم القدرة على الإفادة من الجهود المبذولة في تطوير بصريات تكيفية متقدمة للطب والطيران الفضائي والرقابة العسكرية والإلكترونيات المستهلكين. وثمة تقنية جديدة واعدة بوجه خاص هي البصريات التكيفية المتعددة الترافق<sup>(3)</sup> التي تجري التصحيحات المتعلقة بالاضطراب على ساحة واسعة للرؤية، وهذا يجعل الأنظمة غير مقصورة على اللطخات الصغيرة في السماء المحيطة بنجم مرجعي<sup>(4)</sup>. ويعكف مشروع VLT حالياً على دراسة الاستعمال الفعّال للبصريات التكيفية المتعددة الترافق.

ويمكن لقياس التداخل<sup>(3)</sup>، وهو تقنية تدمج الضوء الوارد من أكثر من مقرب،





50 مترا

700 مليون دولار

مراة أولية مكونة من قطع لها شكل مجسم قطع ناقص

www.astro.lu.se/torben/euro50

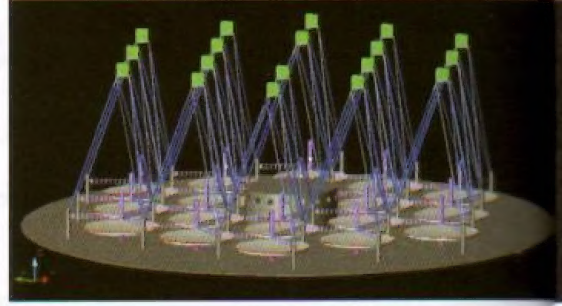


21.4 متر (المساحة)، 24.5 متر (الميز)

500 مليون دولار

سبع مرايا لها شكل مجسم قطع زائد، قطر كل منها 8.4 متر، ومحمولة على حمولة واحدة.

www.gmto.org



استرا [المساحة المكافئة لتجميع الضوء]، 94 مترا [الميز المكافئ]

100 مليون دولار

مراة من الزئبق السائل، ولكل منها شكل مجسم قطع مكافئ وقطر 10 أمتار، وجميعها موجهة إلى الأعلى.

www.astro.ubc.ca/LAMA

تكلفة كل من المكونات تنخفض انخفاضاً حاداً. ويتطلب هذا بدوره مقاربة جديدة للآلات الضوئية. فبدلاً من المراة الأولية العادية التي لها شكل مجسم قطع زائد<sup>(\*)</sup>، والتي توجب أن تكون كل قطعة منها مفصلة تبعاً لموقعها فيها، يمكن أن يكون لمقارب قطره 100 متر مراة كروية، لجميع قطعها شكل واحد. لذا يمكن خُطّ تجميع واحد من إنتاج جميع القطع التي عددها 3048 بمعدل قطعة كل يومين. لكن المشكلة هي أن الشكل الكروي يُحدث تشويهاً للضوء. وبغية تعويض ذلك، لا بد من تزويد المقارب بجهاز يسمى مصححاً<sup>(\*\*)</sup>، يشبه ذاك الذي أصلح رؤية مقارب هبل. ومع ذلك، يظل هذا النظام أرخص ثمناً.

وتمثل القبة إحدى النفقات الرئيسية لبناء أي مقارب. فلمقارب بالومار، مثلاً، قبة حجمها قريب من حجم قبة كاتدرائية القديس بطرس بروما، ولو أنها إلى حد ما لا تدانيتها فنياً. وأحد أسباب كبر قبة بالومار هو أن قاعدة المقارب مائلة بغية توجيهه إلى النجم القطبي. وبهذه الطريقة تتمكن هذه الآلة من تعقب النجوم بسهولة، وذلك بمجرد تدوير المقارب حول

المعارف والخبرات الحالية. والسؤال الرئيسي الآن هو التكلفة. تاريخياً، كان ثمن صناعة مقارب يتناسب مع قطر مرآته الأساسية مرفوعاً إلى القوة  $2.6 (D^{2.6})$ ؛ لذا فإذا كانت تكلفة كل من المقارِب الأربعة VLT التي حجم كل منها ثمانية أمتار قرابة 100 مليون دولار، فإن ثمن المقارب الذي قطره 20 متراً يبلغ نحو بليون دولار - وهذا أكبر مبلغ يأمل أي شخص في جمعه لشراء مقارب جديد. أما تكلفة مقارب قطره 100 متر فمبلغ يُحدث الدوّار في الرؤوس: إنه 70 بليون دولار. وما دام قانون تكلفة المقارِب هذا سارياً، فيجب على الفلكيين التفكير ملياً في بناء نُسخ متعددة لمقارب صغير لبلوغ الحجم المكافئ المنشود، وعندئذ تصبح التكلفة  $D^2$ . فبليون دولار يمكن شراء 10 مقارِب قطر كل منها 8.2 متر مساحتها تكافئ مساحة مقارب واحد قطره 26 متراً. ولسوء الحظ، فلأسباب المذكورة آنفاً، لا يُعني التكافؤ في الحجم تكافؤاً في القدرة. فلصيف array المقارِب العادية حساسية مقارب قطره 26 متراً؛ لكن ميزها هو ميز مقارب قطره 8.2 متر. ولهذا الصّيف، عندما يُستعمل

interferometer، ميز أعلى.

ويسلك تصميم المقارب OWL طريقة مشابهة، لكنه يتميز بإمكان بنائه من بضع مكونات أساسية.

يقع الوزن الإجمالي لهيكل المقارب بين 10 000 طن و 15 000 طن، وهو يتوقف على الاختيار النهائي لمادة المراة. وبغية المقارنة، نذكر أن وزن برج إيقل كان نحو 10 000 طن عندما اكتمل بناؤه. ومع أنه يبدو عملاقاً، فهو أخف كثيراً نسبياً من مقارِب هذه الأيام. فلو كُبرت أحد المقارِب VLT الأربعة ليصبح بحجم OWL، لكان وزنه نصف مليون طن. ومع ذلك، فتحريك 10 000 طن بالدقة المطلوبة هو تحدّ في حدّ ذاته. وتتضمن الخيارات التي يعكف المهندسون على دراستها حالياً عربات نقل منخفضة تشبه عربات القطار، تستعمل إدارات احتكاكية<sup>(\*)</sup> وطبقات رقيقة من الزيت يطفو عليها المقارب (كما هي الحال في وحدات VLT وتعويماً مغنطيسياً<sup>(\*\*)</sup>).

### انتهاك القانون<sup>(\*\*\*)</sup>

يترتب على ما سبق أن الفلكيين لم

(\*) المقارب الأولي هو المقارب الأولي الذي تم إنشاؤه في عام 1917. (\*\*) المصحح هو الجهاز الذي يستخدم لتصحيح التشوهات في الضوء. (\*\*\*) انتهاك القانون هو انتهاك القانون الذي ينص على أن الطاقة لا تضيع.

(\*) المقارب الأولي هو المقارب الأولي الذي تم إنشاؤه في عام 1917. (\*\*) المصحح هو الجهاز الذي يستخدم لتصحيح التشوهات في الضوء. (\*\*\*) انتهاك القانون هو انتهاك القانون الذي ينص على أن الطاقة لا تضيع.

(\*) المقارب الأولي هو المقارب الأولي الذي تم إنشاؤه في عام 1917. (\*\*) المصحح هو الجهاز الذي يستخدم لتصحيح التشوهات في الضوء. (\*\*\*) انتهاك القانون هو انتهاك القانون الذي ينص على أن الطاقة لا تضيع.



## ترجمة في مراجعة

## المقالات

### مقاريب المستقبل العملاقة

خضر الأحمد - عدنان الحموي

<B> جيلموتسي

بعد وقت قصير، لا يتجاوز عقدا من الزمن، يمكن بناءً مقاريب جبارة جديدة، أقوى مئات المرات مما هي عليه حالياً، وقادرة على تحليل كواكب شبيهة بأرضنا تدور حول نجوم أخرى.



4

### رؤية الطيور للألوان

منير الجنزوري - عبدالحافظ حلمي

<H.T> كولدسميث

تتمتع الطيور بنظام لرؤية الألوان يفوق ذلك الموجود عند جميع الثدييات بما فيها الإنسان.



12

### جينومات للجميع

هاني رزق - محمد عبدالحميد شاهين

<M.G> تشرش

يمكن للجيل التالي من التقانات، الذي سيجعل قراءة الدنا DNA سريعة ورخيصة وسهلة المثال، أن ينقلنا، في أقل من عشر سنوات، إلى عصر الطب الملائم لكل شخص.



20

### نحو سيطرة أفضل على الألم

سامي القباني - غسان بيدس

<A> باسباوم - <D> جوليوس

إن تطوير أدوية تعيق سلسلة الإشارات التي تنقل الإحساس بالألم إلى الدماغ، لابد أن يفيد في التخفيف من الآلام المبردة (التي لا علاج لها) حالياً.



30



## رؤية الطيور للألوان

تتمتع الطيور بنظام لرؤية الألوان يفوق ذلك  
الموجود في جميع الثدييات بما فيها الإنسان.

<H. T. كولسميث>



طائر البوقير hornbill الإفريقي الأرضي *Bucorvus leadbeateri* هو كغيره من الطيور، يرى العالم نسيجاً غنياً بالألوان لا نكاد نتخيله. وللطيور هذه القدرة لأنها احتفظت بخلايا مخروطية تتعامل مع الألوان في العين فقدتها الثدييات قبل ملايين السنين.

تمتد إلى أفاق أخرى، فالخفاش الصائد في الليل - على سبيل المثال - يدرك وجود الحشرات الصغيرة بالإنصات لصدى نداءها العالي الحدة.

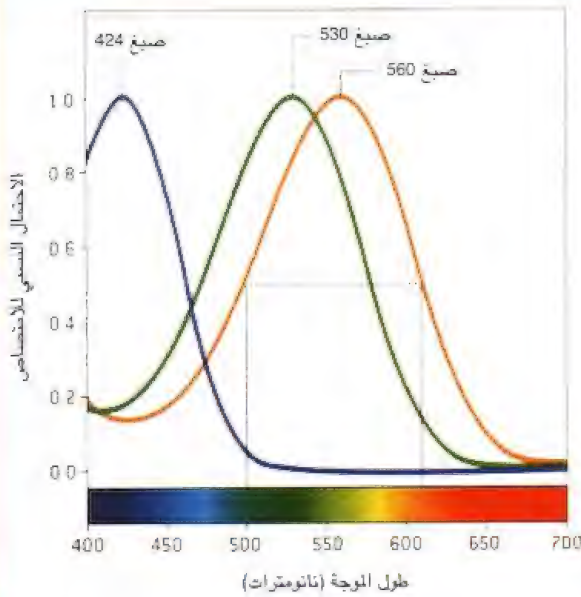
ومن الطبيعي أن تعتمد معرفتنا برؤية الألوان بشكل أولي

WHAT BIRDS SEE (١٠)

لقد اعتدنا، نحن بني البشر، أن نفترض أن جهاز الرؤية لدينا يتربّع فوق قمة من النجاح التطوري، فهو يمكننا من إدراك الكون في أبعاد ثلاثة، وأن نكشف الأشياء عبر مسافات بعيدة، وأن نتنقل هنا وهناك بأمان، وإننا لنستطيع أن نتعرف بدقة أفراداً آخرين، وأن نكشف عواطفهم من مجرد نظرات خاطفة إلى وجوههم. والحقيقة أننا حيوانات مبصرة نرى صعوبة في تخيل العوالم الحسية لمخلوقات لها قدرات



## رؤية الإنسان للألوان<sup>(\*)</sup>



يرى البشر وبعض الرئيسات الأخرى الألوان التي يرونها نتيجة تفاعلات بين ثلاثة طرز من خلايا المخاريط في شبكية العين، ويحتوي كل طراز من المخاريط على صبغ مختلف حساس لدى محدد من أطوال الموجات الضوئية. والطرز الثلاثة من المخاريط تصل أقصى حساسية لها عند نحو 424 و 530 و 560 نانومترا

وفي الشكل ينشأ الخطان الرفيعان הראسيان عند الأطوال الموجية التي تمتص بالتساوي بالصبغ 560. ومع ذلك فإن الفوتونات من الأشعة التي لها طول موجي 500 نانومتر (باللون الأزرق المخضر) لها طاقة أكبر من فوتونات الأشعة التي لها طول موجي 610 نانومترا (باللون البرتقالي)، يحدث كلاهما الاستجابة نفسها من الصبغ، ومن ثم يحدثان الاستثارة نفسها لخلية المخروط. وبناء على ذلك فإن خلية مخروطية واحدة لا تستطيع أن تبين للدماغ طول موجة الضوء الممتص. فلكي يتم تمييز طول موجة من أخرى يتعين على الدماغ مقارنة الإشارات الواردة من مخاريط لها أصباغ بصرية مختلفة

وقد بدأ اكتشاف الرؤية المافوسجية بدراسة الحشرات، وذلك مع حسب استطلاع رجل إنكليزي مرموق هو السير «لوبيوك» (لورد أفبوري Lord Avebury)، وهو صديق وجار لـ «Ch. داروين» وعضو في البرلمان ومالي ومصرفي وعالم آثار وعالم في الطبيعيات؛ لقد اكتشف قبل عام 1882 بقليل أنه في وجود الضوء المافوسجي يقوم النمل بالتقاط العذاري (الخادرات) ويحملها إلى مناطق معتمدة أو إلى مناطق تستضيء بضوء ذي موجات أطول؛ ثم مع بداية أواسط القرن العشرين أوضح عالم الطبيعيات النمساوي «K. ثون فرش» وطلبته (وطلبة هؤلاء) أن النحل والنمل لا ترى الضوء المافوسجي كلون محدد فحسب، بل إن هذه الحشرات تستخدم ضوء السماء المافوسجي كجزء من بوصلة سماوية.

ومعرفة أن حشرات كثيرة جدا تستشعر الضوء المافوسجي قد أدت باختصار إلى فكرة أن هذه المنطقة الطيفية تزود الحشرات بنطاق حسي خاص لا تستطيع مفترساتها من الطيور رؤيته، ولكن لا شيء يمكن أن يكون أبعد عن الحقيقة من ذلك. فالحمل على مدى 35 عاما مضت أوضح أن الطيور والعظايا (السحالي) والسلاحف والعديد من الأسماك لها مستقبلات مافوسجية في شبكيات عيونها. فلماذا - إذاً - تختلف الحال كثيرا في الثدييات؟ ما الذي جعلها تحوز رؤية لونية ضعيفة؟ إن البحث عن إجابات لهذا التساؤل كشف عن قصة تطورية ممتعة، أدت إلى رؤى جديدة للثراء غير العادي في عالم الرؤية عند الطيور.

على ما يراه البشر. ويستطيع الباحثون بسهولة تنفيذ تجارب على عدد من الأفراد المتعاونين لاكتشاف - مثلا - ما إذا كانت مخاليط من الألوان تبدو متماثلة أو مختلفة. ومع أن العلماء توصلوا إلى معلومات مؤيدة من مجموعة متباينة من أنواع أخرى بتسجيل قَدَح (تنشيط) firing الخلايا العصبية، فقد ظللنا لا نعلم حتى بداية السبعينات أن العديد من الفقاريات - ومعظمها حيوانات غير ثديية - يرى الألوان من خلال جزء من الطيف لا يراه البشر: وهو المافوسجي (فوق البنفسجي)<sup>(\*)</sup> القريب.

## نظرة إجمالية/ حكاية تطور<sup>(\*\*)</sup>

- تعتمد رؤية الألوان في الفقاريات على خلايا المخاريط في الشبكية. لقد ثبت أن الطيور، وكذا العظايا (السحالي) والسلاحف والعديد من الأسماك، لها أربعة طرز من خلايا المخاريط، في حين أن لمعظم الثدييات طرازين فقط.
- كان لأسلاف الثدييات المجموعة الكاملة من المخاريط، ولكن خلال فترة من تطورها حينما كانت ليلية النشاط أساسا - وبذا لم تكن رؤية الألوان حاسمة لبقائها - فقدت الثدييات الباكورة طرازين من خلايا المخاريط.
- استعادت أسلاف مجموعة من رئيسات العالم القديم، تشمل الإنسان، طرازا ثالثا من المخاريط عن طريق حدوث طفرة لأحد طرز المخاريط الموجودة.
- لكن معظم الثدييات مازال لها طرازان فقط من المخاريط، وهذا يجعل رؤية الثدييات للألوان - حتى بالنسبة إلى الإنسان ومن ينتسبون إليه - محدودة بشكل واضح عند مقارنتها بعالم الرؤية عند الطيور.

Human Color Vision (\*\*)   
 Overview: An Evolutionary Tale (\*\*)   
 ultraviolet (UV) (1)



## مِيزَةُ الطيور<sup>(١)</sup>

عن طريق تحليل الدنا للأنواع المعاصرة، استطاع العلماء أن ينظروا إلى الزمن الذي مضى ويحددوا كيف تغيرت أصباغ المخاريط مع نشأة الفقاريات. فأوضحت دراساتهم أن الفقاريات الباكرة جدا كان لها أربعة طرز من المخاريط (الثلاث الملوثة)، كل منها يحوي صبغا مختلفا. وقد فقدت الثدييات اثنين من هذه المخاريط خلال تطورها المبكر - على الأرجح - بسبب أن هذه الحيوانات كانت ليلية وأن المخاريط لا يحتاج إليها للرؤية في الضوء الخافت. وعلى النقيض من ذلك، فإن الطيور ومعظم الزواحف احتفظت بأربعة أصباغ مخاريط مختلفة في أطيافها. وبعد انقراض الدينوصورات بدأت الثدييات بالتنوع، واستعاد الخط التطوري الذي أعطى رئيسات العالم القديم التي تعيش حاليا - مثل قرود إفريقيا والقرود العليا والإنسان - طرازا ثالثا من المخاريط خلال تضاعف تلته طفرة في جينة أحد الأصباغ الباقية. ولما كان البشر نشؤوا عن هذا الخيط التطوري للرئيسات فتحن لا نشبه معظم أقاربنا من الثدييات في كوننا نمتلك ثلاثة طرز من المخاريط (بدلا من اثنين) ورؤية لونية ثلاثية الألوان، وهذا يعتبر تحسنا، ولكنه لا يجاري بأية حال عالم الرؤية الأكثر رفاهة ودقة عند الطيور.



(photons)، تغير الطاقة المضافة شكل الريتينال، وتستحث فيضا من الأحداث الجزيئية يؤدي إلى استثارة الخلية المخروطية. وتؤدي هذه الاستثارة بدورها إلى تنشيط الخلايا العصبية للشبكية، حيث تطلق مجموعة منها سيالات عصبية في العصب البصري لتنتقل المعلومات عن الضوء الذي استقبلته إلى الدماغ.

وكلما كان الضوء أشد قوة، امتصت الأصباغ البصرية فوتونات أكثر، وزادت استثارة كل مخروط، وظهر الضوء أكثر زهواً؛ ولكن المعلومات التي ينقلها كل مخروط على حدة محدودة، فالخلية بذاتها لا تستطيع إخبار الدماغ أي طول موجة ضوئية هو السبب في استثارتها. وهناك بعض أطوال موجات ضوئية تمتص على نحو أفضل من غيرها، ويتميز كل صبغ بصري بطيف يوضح كيف يختلف الامتصاص باختلاف طول الموجة. وقد يقوم صبغ بصري بامتصاص طولين موجيين بقدر متساو، ولكن مع أن لفوتونات كل منهما قدرا مختلفا من الطاقة فإن المخروط لا يمكن أن يبنى عن كل منهما بشكل منفرد، حيث إن كلا منهما يغير شكل الريتينال، وبذا

How Color Vision Evolved (١٠٠)

The Avian Advantage (١٠٠)

## كيف نشأت رؤية الألوان<sup>(١٠١)</sup>

تُفهم الاكتشافات على أفضل ما يكون إذا أدركنا بداية بعض التفاصيل الأساسية عن كيف يمكن لأي كائن استشعار اللون. أولا، هناك فهم خاطئ شائع يجب التخلي عنه. فكما يتعلم الكثير في المدرسة، صحيح أن الأشياء تمتص بعض الأطوال الموجية من الضوء وتعكس الباقي منها، وأن اللون الذي نستشعره للأشياء إنما يعتمد على الأطوال الموجية للضوء المنعكس. ولكن اللون ليس في الواقع خاصية للضوء أو للأشياء التي تعكسه، إنه إحساس ينشأ في الدماغ.

في الفقاريات تبدأ رؤية اللون في الخلايا المخروطية بالشبكية، وهي طبقة الخلايا العصبية التي تنقل إشارات الرؤية إلى الدماغ. ويحتوي كل مخروط على صبغ يتكون من إحدى صور البروتين أوبسين opsin مرتبط بجزيء صغير يعرف باسم ريتينال retinal يشبه كثيرا القيتامين A. وعندما يمتص الصبغ الضوء (أو بمعنى أدق يمتص حزما منفصلة من الطاقة تعرف باسم فوتونات



## في الحقيقة، اللون ليس خاصية للضوء أو للأجسام التي تعكس الضوء، إنه إحساس ينشأ داخل الدماغ.



فلامنكو

مضت) كانت الثدييات صغيرة الحجم وتعيش في الخفاء وليلية النشاط. ولما كانت عيونها نشأت لتستفيد من الليل فقد أصبحت معتمدة بشكل متزايد على الحساسية العالية للأعمدة وأقل اعتمادا على رؤية الألوان. ومن ثم فقدت صبغين من أصباغ المخاريط الأربعة التي كانت أسلافها تمتلكها في وقت ما، وهي الأصباغ التي بقيت في معظم الزواحف والطيور.

إن انحسار الدينوصورات قبل 65 مليون سنة أعطى الثدييات فرصا جديدة للتخصص فبدأت بالتنوع، واتخذت إحدى المجموعات - وتشتمل على أسلاف البشر ورئيسات العالم القديم الأخرى - حياة نهائية وانتشرت ما بين الأشجار وجعلت من الفواكه جزءا مهما من وجباتها. وكانت ألوان الزهور والفواكه غالبا مغايرة للأوراق النباتية الخضراء المحيطة بها، ولكن الثدييات - التي كان لها صبغ مخاريط واحد فقط حساس لأطوال الموجات الطويلة - لم تكن قادرة على رؤية التباين بين الألوان في مناطق الطيف الخضراء والصفراء والحمراء. وكان الحل أمام هذه الرئيسات موجودا في صندوق عدة الوسائل التطورية.

في الانقسامات الخلوية الخاصة بإنتاج البويضات والنطاف sperms قد يحدث مصادفة تبادل غير متساو لأجزاء من الصغيات (الكروموسومات) يؤدي إلى إنتاج مشيج (جاميطة) به صبغي يحوي نسخة واحدة زائدة من جينة واحدة أو أكثر. فإذا حافظت الأجيال التالية على هذه الجينات الزائدة فإن الانتقاء (الانتخاب) الطبيعي قد يحفظ الطفرات النافعة التي تنشأ فيها. وكما أوضح «ج. ناثن» و«D. هوكنس» [الذان يعملان في جامعة ستانفورد]، فإن شيئا من ذلك حدث، خلال الـ 40 مليون سنة الأخيرة، في نظام الرؤية عند أجدادنا رئيسات العالم القديم. إن التبادل غير المتساوي للدنا في خلية تناسلية، ثم حدوث طفرة للنسخة الزائدة من جينة لصبغ حساس لأطوال الموجات الطويلة، قد نتج منهما خلق صبغ ثان حساس لأطوال الموجات الطويلة، وهذا مثل نقلة في الطول الموجي لحساسيته القصوى. وعلى ذلك يختلف هذا المسار للرئيسات عن الثدييات الأخرى في حيازته ثلاثة أصباغ للمخاريط بدلا من اثنين ورؤية للألوان ثلاثية.

ومع كونه تحسنا جوهريا، لم يزودنا هذا النظام بالنظام الأمثل لرؤية الألوان. فمزال نظامنا هو ناتج عملية استرداد تطورية، ويظل

(١) ج: أپسين opsin

فإنهما يستحاثان نفس الفيض الجزيئي المؤدي إلى حدوث الاستثارة. وكل ما يستطيع المخروط فعله هو أن يعُد الفوتونات التي قام بامتصاصها، ولكنه لا يستطيع أن يميز طول موجة معينة من طول موجة أخرى، ومن ثم فإن المخروط يمكن أن يُستثار بضوء قوي عند طول موجة يُمتص بقدر ضئيل نسبيا، بنفس قدر استثارته بضوء خافت عند طول موجي يسهل امتصاصه.

والنتيجة المهمة التي يمكن التوصل إليها هنا هي أنه لكي يرى الدماغ الألوان عليه أن يقارن استجابات طرازين أو أكثر من المخاريط المحتوية على أصباغ بصرية متباينة؛ بل إن وجود أكثر من طرازين من المخاريط في الشبكية يسمح حتى بقدرة أعظم على رؤية ألوان مختلفة.

وقد أتاحت الأپسينات<sup>(١)</sup> التي تميز مخروطا من آخر طريقة لدراسة تطور رؤية الألوان. ويستطيع الباحثون استنباط العلاقات التطورية للأپسينات في الطرز المختلفة من المخاريط والمنتمية إلى أنواع مختلفة من الحيوانات، وذلك بفحص تتابع قواعد النكليوتيدات nucleotide bases (أو حروف الدنا DNA letters) في الجينات التي تُكوِّد لهذه البروتينات. وقد أوضحت أشجار النسب التطورية evolutionary trees الناتجة أن الأپسينات بروتينات قديمة وُجدت قبل ظهور المجموعات الحيوانية السائدة التي تعمر الأرض هذه الأيام. ويمكننا تتبع أربعة مسارات لأصباغ مخاريط الفقاريات تُسمى من الناحية الوصفية بحسب المنطقة الطيفية التي تكون فيها أكثر حساسية: طول موجي طويل، طول موجي متوسط، طول موجي قصير، المافوسجي. وفي شبكية جميع المجموعات الرئيسية للفقاريات أعمدة، كما أن لها مخاريط. وتمكّن الأعمدة - التي تحتوي على الصبغ البصري رودوپسين rhodopsin من الرؤية في الضوء الخافت جدا. ويمثل الرودوپسين في كل من تركيبه وخصائصه الامتصاصية أصباغ المخاريط الأكثر حساسية للأطوال الموجية التي تقع عند منتصف طيف الرؤية، وهي كانت قد نشأت عن تلك الأصباغ قبل مئات ملايين السنين.

وللطيور أربعة أصباغ مخاريط تتميز أطيايف بعضها من بعض، نشأ كل واحد منها عن أحد المسارات التطورية الأربعة. أما الثدييات فلها نموذجا طرازان فقط من أصباغ المخاريط، أحدهما حساس للغاية للبفسجي، والآخر حساس عند الأطوال الموجية الطويلة. والتفسير الأرجح لهذه القلة هو أنه خلال تطورها المبكر في حقبة الحياة الوسطى (245 مليون إلى 65 مليون سنة

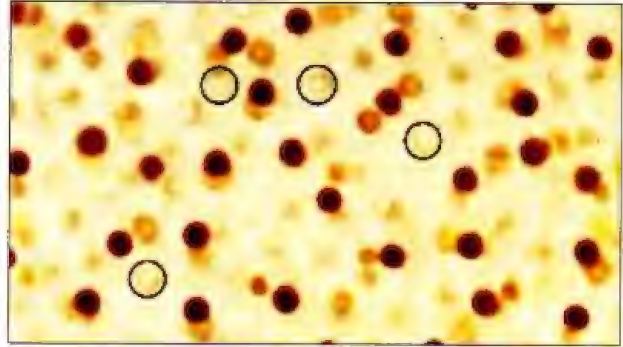


## أهمية قطيرات زيت المخاريط<sup>(\*)</sup>

الترشيح على تضيق الحساسية الطيفية لثلاثة من المخاريط الأربعة للطيور وينقلها إلى أطوال موجية أطول (الرسم البياني). وعن طريق الحد من أطوال الموجات التي تستجيب لها المخاريط تمكن القطيرات الطيور من تمييز ألوان أكثر مما لو كانت تراه بوضوح من دون القطيرات. ويقوم الأوزون في طبقات الجو العليا بامتصاص الأطوال الموجية الأقصر من 300 نانومتر، وبهذا فإن الرؤية المافوسجية للطيور تشمل المافوسجي القريب فقط. في منطقة طول موجي بين 300 و 400 نانومتر.

احتفظت المخاريط في الطيور والعديد من الفقاريات الأخرى ببضع خصائص فُقدت من مخاريط الثدييات. وأهم هذه الخصائص بالنسبة إلى رؤية الألوان هو قطيرات الزيت. فمخاريط الطيور تحوي قطيرات حمراء وصفراء وأخرى عديمة اللون تقريبا وشفافة. والصورة المجهرية لشبكية القرقف الأمريكي (في اليمين) تكشف بوضوح القطيرات الصفراء والحمراء. وتحدد الحلقات السوداء عددا من القطيرات العديمة اللون. وجميع القطيرات، فيما عدا تلك الشفافة حقا، تعمل كمرشحات تزيل الضوء ذا الأطوال الموجية القصيرة. ويعمل تأثير

التأثير الترشيحي للقطيرات



### اختبار رؤية الألوان عند الطيور<sup>(\*\*)</sup>

إن وجود أربعة طرز من المخاريط التي تحتوي على «أصباغ بصرية» مختلفة يعني بالتأكيد أن للطيور قدرة على رؤية الألوان، إلا أن الإيضاح المباشر للقدرة على رؤية الألوان يحتاج إلى تجارب سلوكية تظهر الطيور بها أنها تستطيع تمييز الأشياء الملونة. وهذه التجارب يجب أيضا أن تستبعد العناصر الدالة الأخرى - مثل شدة الاستضاءة - التي قد تستخدمها الطيور. وعلى الرغم من قيام الباحثين بتطبيق تجارب من هذا الطراز على الطيور، فإنهم لم يبدؤوا باختبار دور المخاريط المافوسجية إلا في العقدين الماضيين. وقد عرّضت وطالبي السابق «K. B.» بـتـلـر على استخدام تقنية المضاهاة اللونية للكشف عن الكيفية التي تسهم بها المخاريط الأربعة عند الرؤية.

ولفهم كيف تعمل «المضاهاة اللونية»، ضُغ في الاعتبار أولا رؤية الألوان الخاصة بنا. إن الضوء الأصفر يستثير طرازي مخاريط أطوال الموجات الطويلة في الإنسان. وإضافة إلى ذلك، بالإمكان أن نجد خليطا من الضوءين الأحمر والأخضر يستثير طرازي المخاريط نفسيهما بالقدر نفسه تماما، وسيدركه الشخص الناظر تماما كما يرى اللون الأصفر عند استخدام الضوء الأصفر النقي. وبكلمات أخرى، إن ضوءين مختلفين فيزيائيا قد يتضاهيان في اللون - وهذا يذكرنا بأن استشعار الضوء يحدث في الدماغ. إن أدمغتنا تستطيع تمييز الألوان في هذه المنطقة من الطيف بمقارنة نواتج المخروطين

قاصرا بمقدار صبغ واحد عن نظام الرؤية الرباعي الألوان tetrachromatic visual system الموجود في الطيور والعديد من الزواحف والأسماك. ويعيق تراثنا الجيني أيضا البعض منا على نحو آخر، وذلك إن كنا جينيتينا المختصتين بالأصباغ الحساسة لأطوال الموجات الطويلة تقع على الصبغي X؛ ولما كان لدى الذكور صبغي X واحد فإن حدوث طفرات في أي من جينتي الأصباغ يجعل للذكر المصاب قدرة محدودة على التمييز بين الألوان الحمراء وتلك الخضراء. والإناث اللاتي يعانين هذا الطراز من غمي الألوان أقل شيوعا، ذلك أنه إذا تعطلت جينة للصبغ تقع على نسخة واحدة من الصبغي X فإنهن يظلن يستطعن بناء الصبغ الواقع تحت سيطرة الجينة السليمة على تسختهن الأخرى من الصبغي X.

وليست أصباغ المخاريط هي العناصر الوحيدة التي فُقدت من الشبكية خلال التطور المبكر للثدييات. إن كل مخروط في طائر أو زاحف يحتوي على قطيرة زيت ملونة، ولم تعد هذه القطيرات موجودة في مخاريط الثدييات. وهذه القطيرات - التي تحوي تركيزات عالية من جزيئات تعرف باسم كاروتينويدات - carotenoids - تقع بحيث يمر الضوء خلالها قبيل وصوله إلى رصة الأغشية في الجزء الخارجي من المخروط، حيث يوجد الصبغ البصري. وتعمل قطيرات الزيت كمرشحات تزيل أطوال الموجات القصيرة وتضيق من أطراف امتصاص الأصباغ البصرية. وهذا يقلل من تراكب أطراف الأصباغ بعضها فوق بعض ويزيد من عدد الألوان التي يستطيع الطائر - من ناحية المبدأ - أن يدركها.

The Importance of Cone Oil Droplets (\*)  
Testing Color Vision in Birds (\*\*)





ماكناو

## حتى السبعينات لم يدرك العلماء أن الكثير من الحيوانات ترى الألوان في جزء الطيف المافوسجي القريب.

إلى اللون الخطأ فإنه لم يكن يحصل على جائزة. وقد قمنا بتغيير الخليط الأحمر والأخضر في تتابع غير منتظم. كما غيرنا موقعي الضوءين حتى لا تستطيع الطيور الربط بين الطعام والجانب الأيمن أو الجانب الأيسر. وقد قمنا أيضا بتغيير شدة ضوء التدريب بحيث لا تستطيع الطيور توظيف شدة الإضاءة دليلا لها

وعند استخدام معظم مخاليط الأحمر والأخضر كانت الطيور قادرة بيسر على اختيار ضوء التدريب الأصفر والحصول على جوائزها من الحبوب. ولكن عندما احتوى الخليط على نحو 90 في المئة من اللون الأحمر و10 في المئة من اللون الأخضر - وهي النسبة التي إذا حسبتها وجدناها تضاهي اللون الأصفر لضوء التدريب - أصبحت الطيور مشوشة واختياراتها غير صائبة.

وبإعادة التأكد من أننا نستطيع التنبؤ متى سوف ترى الطيور تضاهي الألوان، بحثنا عن دلائل مماثلة لإظهار أن مخاريط الأشعة المافوسجية تسهم في الرؤية الرباعية الألوان للضوء. وفي هذه التجربة قمنا بتدريب الطيور على استقبال الطعام مع ضوء بنفسجي واستكشفنا قدرتها على تمييز طول الموجة هذا من خليط من طول الموجة الأزرق وشريط عريض من أطوال موجية قرب المافوسجية. وقد وجدنا أن الطيور تستطيع بوضوح تمييز الضوء البنفسجي من معظم المخاليط، بيد أن اختياراتها خضعت للمصادفة عند نسبة 92 في المئة أزرق و8 في المئة مافوسجيا، وهي النسب التي قمنا بحساب أنها تجعل لون الخليط لا يمكن تمييزه من ضوء التدريب البنفسجي. وهذه النتيجة تعني أن الأطوال الموجية للمافوسجية تُرى كألوان محددة بوساطة الطيور وأن مخاريط مافوسجية تسهم في نظام رؤية رباعي الألوان.

### فيما وراء الإدراك البشري

وقد قدمت تجاربنا الدليل على أن الطيور تستخدم الطرز الأربعة من المخاريط جميعا في رؤيتها للألوان. ولكنه من الصعب - بل هو في الحقيقة من المستحيل - على الإنسان معرفة كيف يكون في الواقع إدراكها الحسي بالألوان. فهي لا ترى المافوسجي القريب فقط، بل إنها تستطيع أيضا رؤية ألوان لا نستطيع نحن حتى تخيلها. وللتشبيه - يمكننا القول إن رؤيتنا للألوان على أساس ثلاثي الألوان trichromatic يمكن تمثيلها بمثلث، في حين أن رؤيتها

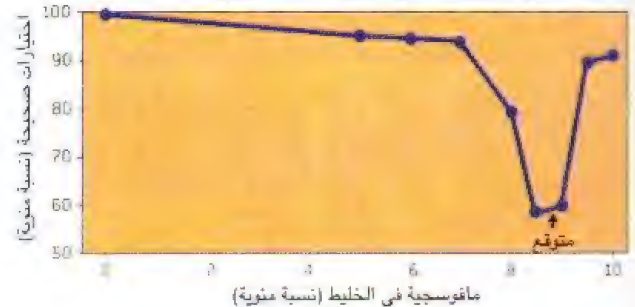
Beyond Human Perception (\*)

الخاصين بأطوال الموجات الطويلة.

وبالاستعانة بمعرفة الخواص الطبيعية للمخاريط الأربعة وقطيرات الزيت استطعتُ و«بتلر» حساب مقدار خليط الأطوال الموجية الحمراء والخضراء الذي يعطي للطائر المظهر اللوني نفسه الناتج من طول الموجة الصفراء. ولما كانت الأصباغ البصرية للبشر والطيور غير متماثلة فإن هذا الخليط يختلف عن ذلك الذي نتوقعه من البشر فيما لو طلبنا إليهم المضاهاة اللونية نفسها. وإذا ما استجابات الطيور للضوء كما نتوقع نحن فإن هذه النتيجة ستؤكد قياساتنا عن الأصباغ البصرية وقطيرات الزيت وستتيح لنا الانطلاق نحو استكشاف ما إذا كانت المخاريط الحساسة للضوء المافوسجي تؤدي دورا في رؤية الألوان، وكيفية ذلك.

وقد تم تطبيق التجارب على ببغاوات أسترالية صغيرة تعرف باسم «الدرّة» budgerigars (*Melopsittacus undulatus*). دربنا الطيور على الربط بين جائزة من الطعام والضوء الأصفر. وكان الطائر يجثم في موقع يرى منه مصدرين للإضاءة على بعد نحو ثلاث أقدام. أولهما كان ضوء التدريب الأصفر والآخر خليطا متنوعا من الأحمر والأخضر. وخلال الاختبار كان الطائر يطير إلى الضوء حيث توقع طعاما. فإذا ما ذهب إلى الضوء الأصفر يفتح قمع صغير للبدور برفة حيث يحصل الطائر على وجبه سريعة. أما إذا ذهب الطائر

### الدليل على الرؤية المافوسجية عند الطيور



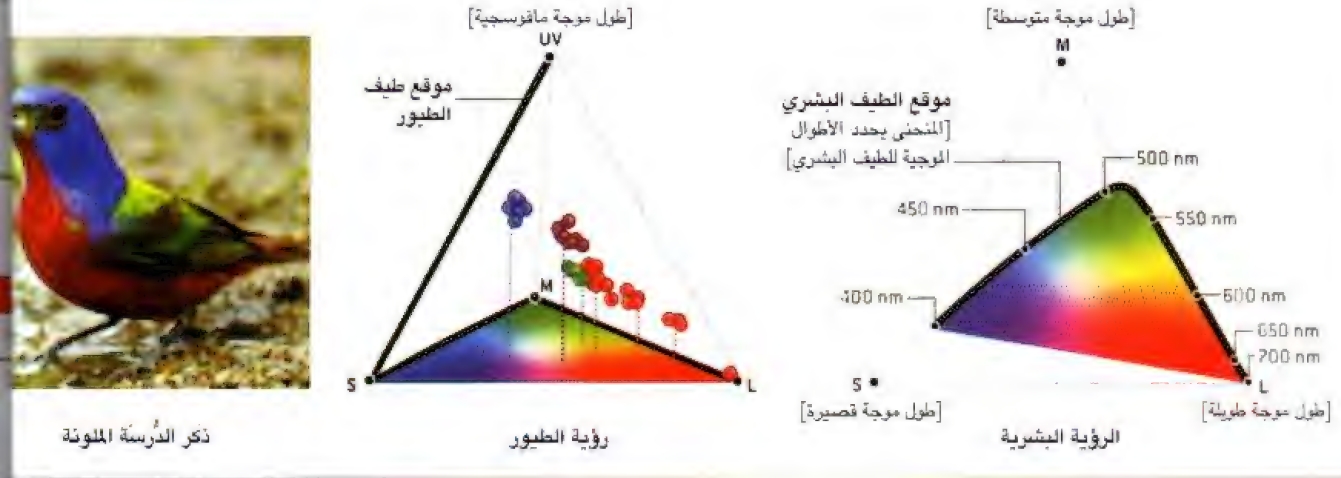
هل الطيور ترى، حقيقةً، الأطوال الموجية المافوسجية؟ لقد أوضح المؤلف وزملاؤه في تجربة أنها فعلا تراها. فقد قام الباحثون بتدريب طيور الدرة الأسترالية parakeets على تمييز ضوء التدريب البنفسجي من الضوء المكون من مخاليط من الأزرق والمافوسجي. أما عندما يكون الخليط مكونا من 8% فقط من المافوسجي فإنه يضاهي لون ضوء التدريب وترتكب الطيور أخطاء عديدة. وتهبط اختياراتها إلى محض المصادفة عند النقطة (السهم) التي حسب عندها المؤلف أن الألوان ستضاهي على أساس قياسات الأصباغ البصرية وقطيرات الزيت في مخاريط الطيور.



## نظرة واقعية مختلصة إلى عالم الرؤية للطيور

من عدد الألوان التي يستطيع أن يراها الطائر [كما هو موضح في الإطار في الصفح 16]، فإن موقع الطيف سيتبع حافات القاع المثلث وليس شكل زعنفة سمكة القرش. مثلث الرؤية البشري. وتقع الألوان التي تتوافق مع مستقبلات مافوسجية في الحيد فوق ذلك القاع. وعلى سبيل المثال يعكس الريش الأحمر والأخضر والأزرق لطائر الدُرْسَة الملونة (الصورة) كميات متنوعة من الضوء المافوسجي، إضافة إلى الألوان التي نراها نحن البشر (الرسم البياني) ولتوضيح الألوان التي تراها انثى طائر الدُرْسَة بيانيا عندما تنظر إلى شريكها غير

يمكن رسم رؤية الألوان لدى البشر على شكل مثلث. إن جميع ألوان الطيف التي نستطيع نحن البشر أن نراها مَوْقَعَة على امتداد المنحنى الأسود الثقيل في داخل المثلث، وجميع الألوان العديدة الأخرى التي تَكُونُ بخليط من الأضواء تقع أسفل هذا المنحنى ولكي نرسم خريطة لرؤية الألوان في طائر نحتاج إلى إضافة بُعد آخر، والنتيجة تكون شكلا مجسما، رباعي الأوجه. إن جميع الألوان التي لا تنشِطُ مستقبلات مافوسجية تقع في قاع رباعي الأوجه، إلا أنه بسبب أن قطيرات الزيت للمخروط تزيد



ذكر الدُرْسَة الملونة

رؤية الطيور

الرؤية البشرية

مجموعات من الباحثين من إنكلترا والسويد وفرنسا بدراسة القَرَقَف الأزرق (Parus caeruleus) blue tit، وهو طائر آسيوي أوروبي من أقارب قراقف chickadees أمريكا الشمالية، وطائر الزرزور (Sturnus vulgaris) starling. وأشارت النتائج إلى أن الإناث تنجذب في الواقع إلى الذكور التي ينعكس عنها ضوء مافوسجي زاهٍ بقدر أكبر. ولكن ما أهمية ذلك؟ إن انعكاس الضوء المافوسجي من ريش الطيور يعتمد على التركيب تحت المجهرى للريش، وبذا يمكن استخدامه كدليل مفيد على صحة ذكور الطيور. وقد أوضح <A>، كيسر< و>G<، هل< [من جامعة جورجيا، وجامعة أوبورن] أن ذكور الطيور الضخمة المنقار الزرقاء blue grosbeaks (Guiraca caerulea) التي لها الريش الأزهى والتي يميل لونها الأزرق إلى المافوسجي بدرجة أكبر، تكون أكبر حجما وتسيطر على الأراضي المحتوية على أكبر قدر من الفرائس وتطعم نسلها عدد مرات أكثر مما تفعل الذكور الأخرى.

وعلى نحو أعم، إن امتلاك مستقبلات للأشعة المافوسجية يزود الحيوان بميزة في البحث عن الغذاء. وقد أوضح <D>، بوركارت< [من جامعة ريجنزبورج في ألمانيا] أن السطح الشمعي لكثير من الفواكه والثمار يعكس ضوءا مافوسجيا ربما يعلن عن وجودها وقد وجد <J>، فايتالا< [من جامعة جيفاسكيليا في فنلندا] وزملاء له

للألوان على أساس رباعي التلوين تتطلب بعدا إضافيا ليعطي شكلا رباعي الأوجه tetrahedron أو هرمًا مثلثيا triangular pyramid. إن الحيز الواقع فوق أرضية الشكل الرباعي الأوجه يحتوي تنوعا من الألوان يقع أبعد من حدود الخبرة البشرية المباشرة.

كيف تستفيد الطيور من هذه الثروة من المعرفة بالألوان؟ في كثير من أنواع الطيور نجد الذكور أزهى ألوانا من الإناث، وبعد اكتشاف حساسيتها للضوء المافوسجي قام الباحثون بالبحث عن أدلة تشير إلى أن الألوان المافوسجية غير المرئية للإنسان قد تؤثر في اختيارات الزوج.

وفي أحد اتجاهات الأبحاث قام <M>، إيتون< [وكان حينذاك في جامعة منيسوتا] بدراسة 193 نوعا من الطيور التي يبدو فيها الشقان الجنسيان متماثلين بالنسبة إلى الإنسان الفاحص، واعتمادا على قياسات أطوال موجات الضوء المنعكسة من الريش استنتج أن عين الطائر فيما يزيد على 90% من هذه الأنواع ترى فروقا بين الذكور والإناث لم يكن علماء الطيور قد تعرفوها من قبل.

وفي دراسة على ذكور 108 أنواع من الطيور الأسترالية قام بها <F>، هوسمان< ومجموعة دولية من زملاء، وجدوا أن الألوان ذات المكوّن المافوسجي تزيد زيادة ذات دلالة إحصائية في الريش الذي يؤدي دورا في عروض الغزل، عما هي في الريش من أجزاء أخرى من الطائر. إضافة إلى ذلك، قامت



وكثيراً ما سألتني غير المعنيزين بهذه النتائج المثيرة للاهتمام؛  
ما فائدة الرؤية المافوسجية للطيور؟ ويبدو أن السؤال يعني أن  
الحساسية للمافوسجية يجب أن تكون مسألة خصوصية أو  
حتى مجرد صفة يجب على الطيور أن تحترم نفسها أن تكون  
قادرة على أن تعيش سعيدة من دونها، إننا منغلِقون داخل عالم  
من حواسنا إلى حد كبير: فعلى الرغم من إدراكنا معنى فَقْدِ  
الرؤية ونخشاه، فإننا لا نستطيع أن نستحضر في أذهاننا  
صورة عالم مرئي أبعد من عالمنا. إنه مما يدعونا إلى التواضع  
أن نكشف أن الإتيقان التطوري ما هو إلا سراب وأن العالم  
ليس تماماً هو ما تخيله نحن عندما نعايره من خلال عدسة  
اهتمامات الإنسان بذاته.

---

Imagining a UV World (\*)

اَلْمَوْلَى

Timothy H. Goldsmith

أستاذ فخري في البيولوجيا الجزيئية والخلوية والتكوينية في جامعة ييل، وزميل في الأكاديمية الأمريكية للفنون والعلوم و American Academy of Arts and Sciences. وكان قد درس الإبصار في القشريات والحشرات والطيور على مدى خمسة عقود. وقد رعى الاهتمام بدراسة تطور كل من الإدراك المعرفي والسلوك عند الإنسان، وكان مغرماً بالتفكير والكتابة مع علماء القانون، وذلك عن طريق صلتة بمعهد كروتر لأبحاث القانون والسلوك Cruter Institute for Law and Behavioral Research. وقد قام «كولدمسмит» قبل اثنتي عشرة سنة من اعتزاله بتدريس مقرر في العلوم الإنسانية والاجتماعية، وألف بالاشتراك مع W. زمران - كتاباً بعنوان: «البيولوجيا والتطور والطبيعة البشرية»

Biology, Evolution and Human Nature

مراجع للاستفادة

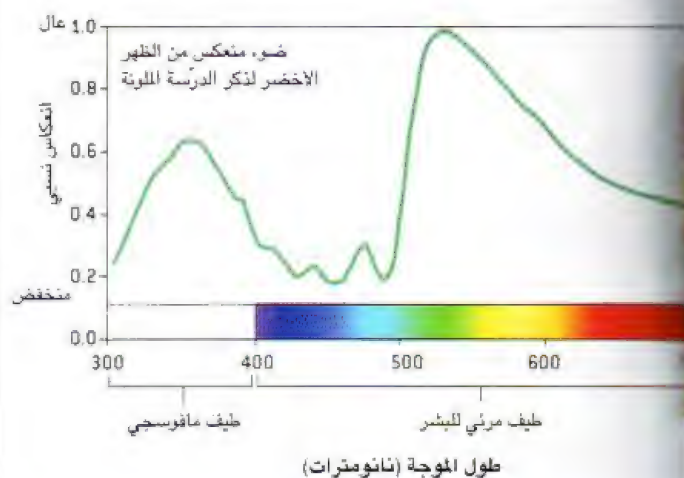
**The Visual Ecology of Avian Photoreceptors.** N. S. Hart in *Progress in Retinal and Eye Research*, Vol. 20, No. 5, pages 675–703; September 2001.

Ultraviolet Signals in Birds Are Special. Franziska Hausmann, Kathryn E. Arnold, N. Justin Marshall and Ian P. F. Owens in *Proceedings of the Royal Society B*, Vol. 270, No. 1510, pages 61–67; January 7, 2003.

**Color Vision of the Budgerigar (*Melopsittacus undulatus*): Hue Matches, Tetrachromacy, and Intensity Discrimination.** Timothy H. Goldsmith and Byron K. Butler in *Journal of Comparative Physiology A*, Vol. 191, No. 10, pages 933–951; October 2005.

Scientific American, July 2006

يقع المركز من الثلث المسطح إلى الحيز الثلاثي الأبعاد لرباعي الأوجه  
في الأتوان المنعكسة عن مناطق صغيرة من الريش تمثل بتجمعات من نقاط  
الريش الحمراء للصدر والزور (الرقبة) أحمر أدكن للعجز، أخضر للظهر، أزرق للرأس  
والذي لا يستطيع استشعار هذه الألوان التي يراها الطائر، لأنه ليس هناك من  
التي يستطيع استشعار هذه الألوان). وكلما كان اللون مافوسجيا أكثر  
في النقاط أعلى فوق القعر. وهناك توزيع للنقاط داخل كل من هذه التجمعات، حيث  
تكون الموجية للضوء المنعكس تختلف داخل المناطق، مثل ما نراه نحن البشر  
على حمار للصدر والزور.



تَخِيلُ عَالَمَ مَافُوسَجِي<sup>(\*)</sup>

مع أنه لا يعلم أحد كيف يبدو العالم للطيور فإن الصور لأزهار السوزانات السوداء العينين black-eyed Susans تقدم لمحة عن كيف يمكن أن تغير القدرة على رؤية ضوء مافوسجي من الصورة التي يبدو عليها العالم. وبالنسبة إلينا فإن مركز الزهرة عبارة عن قرص قاتم صغير (في اليسار) ولكن كاميرة مجهرية للكثيف عن الضوء المافوسجي فقط "ترى" أنماط غير مرئية لنا، ويشمل ذلك حلقة دكناء أكبر (في اليمين). وقد أعد هذه الصور D. A. هازي، أستاذ التصوير وتقانة التصوير الفوتوكرافي في معهد روشستر للتقانة  
Rochester Institute of Technology  
البحرور





## جينومات للجميع<sup>(١)</sup>

يمكن للجيل التالي من التقانات، الذي سيجعل  
قراءة الدنا DNA سريعة ورخيصة وسهلة المنال،  
أن ينقلنا، في أقل من عشر سنوات، إلى  
عصر الطب الملائم لكل شخص.

<M.G. تشرشر>



عندما انطلقت في عام 1993 الوب (الشبكة العالمية الانتشار) web، راجت وانتشرت بين ليلة وضحاها، خلافا لمعظم التقانات الجديدة التي تحتاج نمطيا إلى عشر سنوات على الأقل كي تنتقل من إثبات الفكرة إلى القبول الواسع. ولكن الشبكة لم تظهر حقيقة في غضون عام واحد؛ فقد اعتمدت على البنية التحتية بما في ذلك بناء الإنترنت ما بين عامي 1965 و 1993، كما اعتمدت على الإدراك المفاجئ بأن وسائل معينة، كالحواسيب الشخصية، قد تجاوزت العتبة الحرجة. كما أن قوى التبصر والسوق تحث على تنامي التقانات الجديدة وانتشارها. فمثلا، بدأ برنامج الفضاء برؤية حكومية، وبعد انقضاء زمن طويل نسبيا، دفعت الاستعمالات العسكرية والمدنية للسوائل إلى قابلية التسويق التجاري. وإذا ما تطلع أحدنا إلى الثورة التقنية التالية، التي يمكن أن تتمثل بالنقانة الحيوية، فسيمكنه تصور كيف ستشكل الأسواق والرؤى والاكتشافات والاختراعات مخرجاتها، وكذلك تصور العتبات الحرجة في البنية التحتية والوسائل التي ستجعل ذلك ممكنا.

(١) الأقمار الصناعية







لقد كنت في عامي 1984 و 1985 واحداً بين دزينة تقريباً من باحثين، اقترحوا مشروع الجينوم (المجين) البشري Human Genome Project (HGP)، كي نتمكن، لأول مرة، من قراءة كامل كتاب التعليمات من أجل تكوين إنسان والإبقاء عليه والمتضمنة داخل دنانا our DNA. وكان هدف المشروع إنتاج تسلسل كامل لجينوم بشري بتكلفة ثلاثة بلايين دولار أمريكي وذلك ما بين عامي 1990 و 2005.

لقد نجحنا في إنهاء القسم الأكثر سهولة، البالغ 93 في المئة، قبل الموعد المحدد ببضع سنوات، وفي توريث كم كبير من تقانات ومن طرائق مفيدة. وخفض التحسين المتنامي لهذه التقانات ولهذه الطرائق سعر السوق لسلسلة جينوم بشري، سلسلة دقيقة بما يكفي كي تكون مفيدة، إلى تكلفتها الحالية البالغة 20 مليون دولار. ومع ذلك، فإن هذا المعدل يعني أن السلسلة الجينية الواسعة النطاق لاتزال بصورة رئيسية مقتصرة على المراكز المخصصة للسلسلة وحكراً على مشاريع الأبحاث المكلفة.

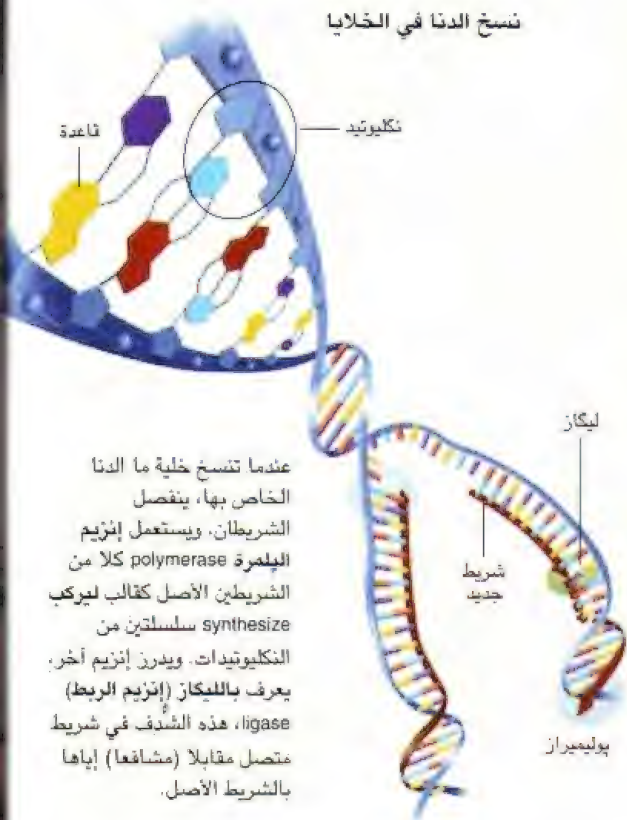
لقد غدا «جينوم ألف دولار» تجسيدا لوعده مثلته المقدرة على سلسلة الدنا؛ سلسلة أصبحت تكلفتها قابلة للتحميل لدرجة أن بوسع الأفراد أن ينظروا إلى فكرة الإنفاق مرة واحدة في العمر للحصول على كامل تسلسل الجينوم الشخصي لكل منهم بحيث يقرأ الطبيب هذا التسلسل على قرص يقارنه بتسلسل مرجعي، على أنها فكرة تستحق هذا الإنفاق. كما أن تقنية السلسلة الرخيصة ستجعل المعلومات الجينية ذات معنى أعمق، وذلك بمضاعفة عدد الباحثين القادرين على دراسة الجينومات، وعدد الجينومات التي يستطيعون مقارنة بعضها ببعض كي يستنتجوا الاختلافات بين الأفراد في كل من المرض والصحة.

وتتخطى جينوميّات genomics الإنسان البشر إلى بيئة مليئة بالمُمرضات والمستأرجات allergens والميكروبات (الأحياء الدقيقة) النافعة والموجودة في طعامنا وفي أجسامنا. ويُعنى كثير من الناس بخراط مناهية، ولعلنا سنفيد في وقت ما من خراط يومية للممرضات والمستأرجات. كما أن المجالات المتسارعة في نموها للتقانة النانوية، والتقانة الحيوية

## نظرة إجمالية/ ثورات الدنا

- يمكن للكمون الكلي full potential للتقانة أن يتحقق فقط عندما تكون أدواته، كتقانة قراءة الجينوم، رخيصة وسهلة المنال كالحواسيب الشخصية حالياً.
- تُخفّض المقاربات الجديدة لقراءة الدنا التكاليف باختصار الخطوات التحضيرية، وضمة miniaturizing التجهيزات، وسلسلة ملايين الجزيئات سلسلة متزامنة.
- وسيطرح تحقيق الهدف المتمثل بسلسلة منخفضة التكلفة أسئلة جديدة حول الكيفية الأفضل لاستخدام المعلومات الجينية الشخصية الوافرة، وحول الجهة المخولة بهذا الاستخدام. ويُعد مشروع الجينوم الشخصي محاولة للبدء باستكشاف هذه القضايا.

إن كثيراً من تقانات حل (فك) كود الجينومات، يفيد من مبدأ التتامية في تراكب (تشافغ) قواعد الدنا. وتحوي ألفباء الجينوم أربعة أحرف فقط: تشكل وحدات جوهريّة تسمى القواعد، وهي: الأدينين [A] والسيتوزين [C] والگوانين [G] والتايمين [T]. يترابط بعضها مع بعض [A مع T، و G مع C]، لتشكل درجات السلم الكلاسيكي للدنا. إن الرسالة المكوّدة في تسلسل القواعد على طول شريط "الدنا مكتوبة فعلياً مرتين؛ ذلك أن تعرف هوية قاعدة في أحد الشريطين يكشف عن متمة القاعدة في الشريط الآخر. وتستعمل الخلايا الحية هذا المبدأ لتتسخ وتصلح جزيئات الدنا الخاصة بها [في الأسفل]. كما يمكن استثمارها لتتسخ (1 و 2) ولويسم الدنا المعني، وذلك كما هي الحال في تقنية السلسلة التي طورها «F. سانكر» في سبعينات القرن الماضي (3 و 4) والتي لاتزال تشكل أساس معظم السلسلة التي تتم حالياً

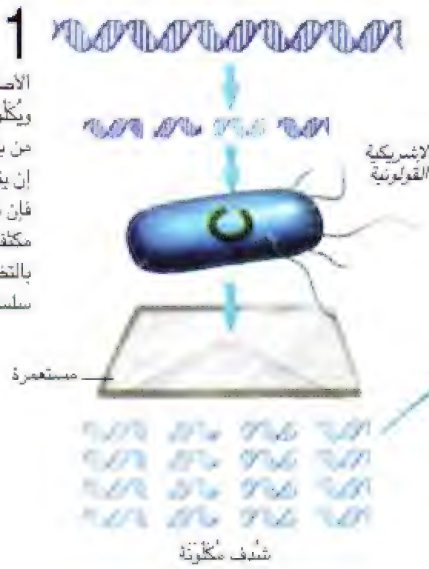


الصناعية، قد تسرّع هي الأخرى البحث عن مقاييس بيولوجية لمواد «ذكية» جديدة، وعن ميكروبات، يمكن أن تستعمل في التصنيع أو في المعالجة البيولوجية للتلوث. وتبقى التكلفة وحدها العقبة الرئيسية أمام هذه التطبيقات وكثير غيرها، بما في ذلك ما علينا أن نتصوره للمستقبل. ويتحدى مشروعان لتقانات ثورية في سلسلة الجينومات Revolutionary Genome Sequencing Technologies المعاهد الوطنية للصحة، العلماء كي يتوصلوا في عام 2009 Reading DNA (\*\*) Overview/ DNA Revolutions (4)

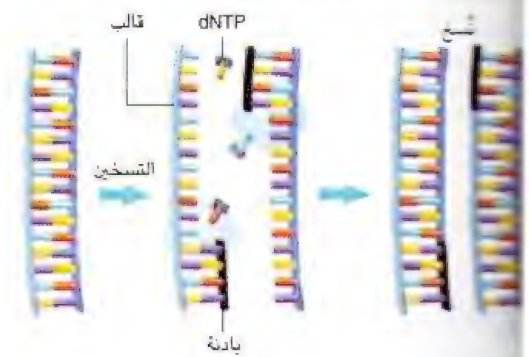
(١) أو طاق أو خيط



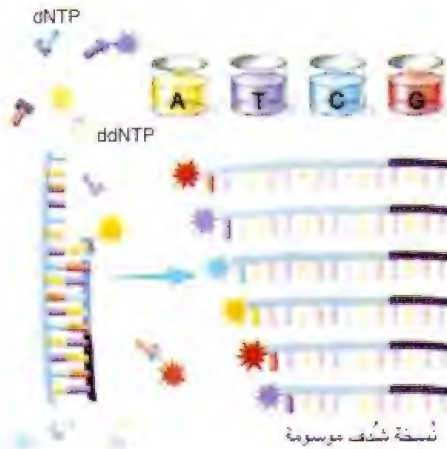
1 قبل أسلوب «سانكر» في السلسلة، كان شريط الدنا الأصلي يُجزأ إلى شُدَف أصغر، ويُكُون (يُسَلِّ) ضمن مستعمرات من بكتيريا الإشريكية القولونية. وما إن يتم استخلاصها من البكتيرات، فإن شُدَف الدنا تُخضع لدورة مكثفة أخرى من النسخ، تعرف بالتضخيم، بـسريرة تسمى تفاعل سلسلة إنزيم البلمرة (PCR)



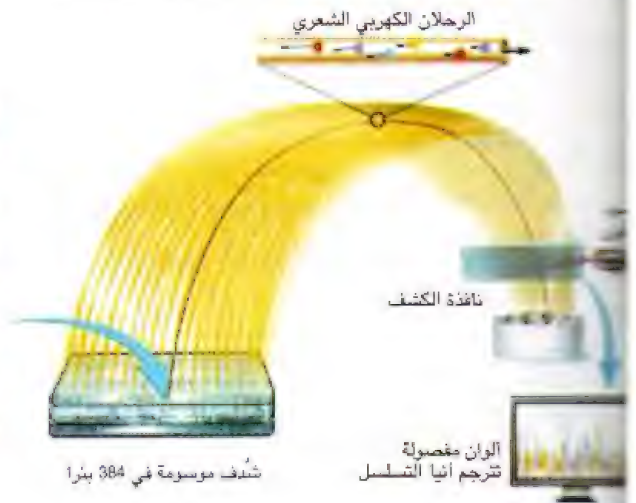
2 تسخن شُدَف الدنا في أثناء سريرة التفاعل PCR، فتنتشر إلى شريطين مفردين. يُلْدَن annealed عندئذ تسلسل قصير من النكليوتيدات، يعرف بالبادة (المُرْسَة) primer، بكل قالب أصلي. وانطلاقاً من البادة يرتبط البوليميراز النكليوتيدات الحرة الطافية (ثالث فسفات ديوكسي نكليوتيد de-dNTP)، ليُشكَل اشربة متممة جديدة. وتعاد السيرة تكراراً، لتوليد ملايين النسخ من كل شُدَف دنا



3 توسم بعدئذ الشُدَف الأحادية الطاق بسريرة مشابهة للتفاعل PCR، ولكن بإضافة نكليوتيدات منتهية terminators موسومة فلوريا (بجزيئات تعرف بثنائي ديوكسي ثالث فسفات dedoxynucleotide (ddNTPs)، تُضاف إلى مزيج البادئات والبوليميراز والنكليوتيدات dNTPs. وعندئذ تُبنى الاشربة المتممة حتى يتم مصادفة انجبال أحد النكليوتيدات ddNTPs، فيتوقف التركيب آنياً. ويكون لنسخ الشُدَف الناشئة أطوال مختلفة، ويوجد في إحدى نهايتي كل نسخة نكليوتيد موسوم.



4 يفصل الرحلان الكهربائي الشعري capillary electrophoresis الشُدَف التي تكون مشحونة سلبياً بحملها نحو قطب مشحون إيجابياً، وبالنظر إلى أن أقصر الشُدَف تسير أسرع، فإن ترتيب الشُدَف بعكس حجمها، ومن ثم يمكن للمنهاي أن «يقرأ» على أنه تسلسل قواعد القالب. وينشط ضوء الليزر العلامة الفلورية fluorescent tag في أثناء مرور الشُدَف عبر نافذة الكشف، منتجة ألواناً مفصولة، تترجم آنياً إلى تسلسل



## إعادة اكتشاف قراءة الجينات<sup>(1)</sup>

في أي طريقة من طرائق السلسلة، يمكن لحجم الدنا نفسه وتركيبه ووظيفته أن تشكل عائقاً أو يمكن منابقتها كي تصبح ميزات، ويتألف الجينوم البشري من ثلاثة بلايين زوج (شفع) من

Reinventing Gene Reading (١)

(١) هي شُدَف الدنا التي لا بد من ارتباط نكليوتيداتها القليلة (٨ نكليوتيدات تقريباً) بالقالب، كي يلتصق بها بوليميراز (إنزيم يلحرة) الدنا DNA polymerase، ويبدأ بتركيب الشريط أو الشُدَف المتممة للقالب؛ إنها تبدأ تنسخ الدنا، أو تركيبه (التحرير)

إلى سلسلة جينومية للإنسان تكلفتها مئة ألف دولار، وفي عام 2014 بتكلفة ألف دولار فقط. كما أن هنالك إمكانات لإنشاء أسلوب: يمكن تحديده لاحقاً، لمنح جائزة نقدية لأول فريق يحقق مثل هذه الاختراقات. إن هذه الأهداف قريبة فعلاً. ويوضع مسح للمقاربات الجديدة في تطور طرائق قراءة الجينوم إمكان تحقق خروقات تقانية: يمكن أن تنتج جينوما بشرياً بتكلفة قدرها عشرون ألف دولار، في خلال أربع سنوات من الآن. كما أن هذه الخروقات ستلقي الضوء على بعض الاعتبارات التي ستنشأ حال نجاحها.

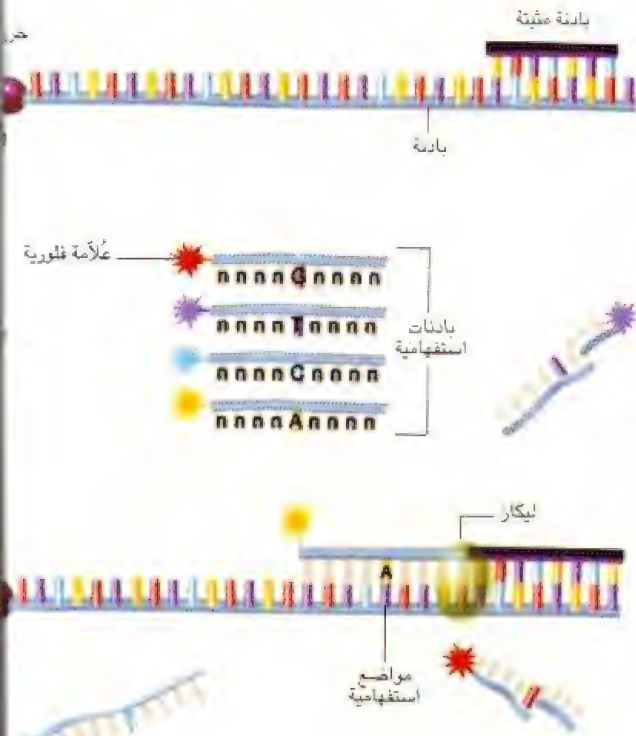


## السلسلة بالتركيب<sup>(١)</sup>

التفاعلات الكيميائية، ولكن التقنيتين تخفضان تكاليف السلسلة، وتزيد السرعة بمنحمة التجهيزات لإنقاص كمية الكيمائيات المستعملة في الخطوات كلها، وبقراءة ملايين شيفر الدنا قراءة متزامنة (الصفحة المقبلة).

### الربط

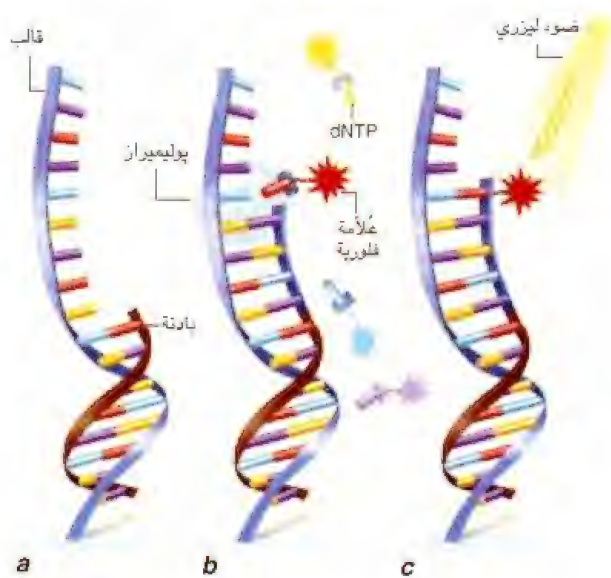
ترتبط بادئة مخبئة anchor primer بقالب وحيد الشريط لتعيين بداية تسلسل مجهول (a) تُنشأ «بادئات استقصائية» query primers قصيرة موسومة فلوريا بدءا من دنا تنكسي باستثناء نكليوتيد واحد في الموضع الاستقصائي query position يحمل نمطا واحدا من أنماط القواعد الأربعة (b) يقوم الليكاز (إنزيم الربط) بربط واحدة من البادئات بالبادئة المثبتة باتباع أسس تزاوج القواعد ليقابل القاعدة في الموضع الاستقصائي في الشريط قالب (c). وينتزع عندئذ معقد البادئة الاستقصائية المثبتة anchor-query primer complex وتعاد السيرورة من جديد إنما في موضع مختلف من القالب



بحاكي معظم تقانات السلسلة الجديدة أوجها من التركيب الطبيعي للدنا، وذلك بغية تعرف القواعد في شريط دنا معني، إما «باطالة القواعد» base extension أو «بالربط» ligation (الأسفل). وتعتمد كلتا المقاربتين على دورات متكررة من

### إطالة الأسس

تثبت شدة أحادية الشريط (تعرف بالقالب). على سطح، بحيث تكون نقطة البدء لشريط متمم (يعرف بالبادئة)، مرتبط بإحدى نهايتي القالب (a). عندما تُعرض نكليوتيدات dNTPs موسومة فلوريا وإنزيم البوليميراز للقالب ستضاف قاعدة متممة للقالب إلى شريط البادئة (b) ويزال بعدئذ ما تبقى من البوليميراز والنكليوتيدات dNTPs، ثم يؤثر ضوء الليزري العلامة الفلورية، كاشفا عن هوية النكليوتيد المتحد الجديد (c). وتنزع عندئذ العلامة الفلورية من النكليوتيد الجديد، ثم تبدأ السيرورة من جديد.



يستعمل كشف بيروفسفات الضيائية الأحيائية bioluminescence، عوضا عن الفلورة fluorescence، لتحفيز أحداث إطالة القواعد يتحرر جزيء من بيروفسفات عندما تُضاف قاعدة إلى الشريط المتمم، محدثا تفاعلا كيميائيا مع بروتين ضيائي أحيائي، يُنتج وميضاً ضوئياً

من هذه الصيغيات: واحدة من الأب والأخرى من الأم، تختلف إحداهما عن الأخرى بنسبة واحد في المئة. وهكذا، يمكن القول حقيقة إن الجينوم الشخصي لفرد ما، يحتوي على ستة بلايين زوج من القواعد. إن تعرف كل قاعدة من القواعد الأربع في ضد (طول) من الجينوم، يتطلب محسناً (جهازاً حساساً) sensor يستطيع كشف الفروق بين أنماط القواعد الأربع، بمقياس ما دون النانومتر subnanometer-scale. ويُعتبر المجهر النفقي الماسح scanning tunneling microscopy إحدى الأدوات لطريقة فيزيائية

Sequencing By Synthesis (١)

(١) أو ميسم أو سمة

جزيئات النكليوتيدات. ويحوي كل نكليوتيد منها واحداً من أربعة أنماط من القواعد (الأسس)، تُختصر بالأحرف A و C و G و T: تمثل القباء الجينوم: مكوّدة المعلومات المختزنة في الدنا. وترتبط القواعد نمطياً وفقاً لبادئ صارمة لتشكيل الدرجات في بنية الدنا المتماثلة للسلم. وبسبب قواعد الارتباط هذه، فإن قراءة تسلسل القواعد على طول أحد نصفي السلم، تكشف أيضاً عن التسلسل المتمم على النصف الآخر.

إن جينومنا، ذا الثلاثة بلايين قاعدة مقسم إلى ثلاثة وعشرين صبغياً (كروموزوما) منفصلة، ولدى الناس عادة مجموعتان كاملتان



الأطوال تنتهي كل شدة منها بقاعدة موسومة فلوريا (تألقيا) fluorescently tagged base. وعند فصل تلك الشدء وفقاً لأحجامها بسيرورة تُعرف بالرحلان الكهربائي، ثم قراءة الإشارة الفلورية لكل علامة طرفية terminal tag عند مرورها بوساطة منظار خاص، فإننا نحصل على تسلسل القواعد في شريط strand الدنا الأصلي [انظر الإطار في الصفحتين 22 و 23].

وتشكل الوثوقية والدقة ميزتين أساسيتين لسلسلة «سانكر». ومع أن تحسينات كثيرة أدخلت على التقنية عبر السنوات، فإنها تبقى مبددة للوقت ومكلفة، لذا، فإن معظم مقاربات السلسلة البديلة عن طريقة «سانكر»، تسعى إلى زيادة السرعة وتخفيض التكلفة، بحذف خطوات الفصل البطيئة ونممة المكونات لانقاص حجوم الكيماويات، وإجراء التفاعلات بطريقة التوازي المفرطة التعدد: بحيث تُقرأ ملايين شدة التسلسل في وقت واحد.

وتقاربت مجموعات بحثية كثيرة على طرائق، كثيراً ما جمعت مع بعضها تحت عنوان السلسلة بالتركيب synthesis، ذلك أنها تفيد من السيرورات العالية الدقة، التي تستعملها المنظومات الحية في نسخ جينوماتها وتصليحها، فمثلاً، عندما تستعد خلية للانقسام، تنفصل قائمتا سلم جزئي الدنا إلى شريطين. وعندئذ يتحرك الإنزيم، يُعرف بالبوليميراز (إنزيم اللمرة) على طول الشريطين (الطاقين) وباستعماله الشريط الأصلي (القديم) كقالب template، وباتباعه مبادئ تزاوج (تشاقع) القواعد، فإن البوليميراز يحفز إضافة نكليوتيدات، ليشكل تسلسلات متممة. ويقوم إنزيم آخر، يعرف بالليغاز (إنزيم الربط) بوصل هذه القطع - لتتشكل أشرطة جديدة تكون متممة بالكامل للقوالب الأصلية.

وتحاكي طرائق السلسلة بالتركيب أجزاء من هذه السيرورة، على شريط دنا مفرد موضع الاهتمام، فما إن تبدأ سيرورة إضافة القواعد عن طريق البوليميراز عند نقطة البدء الخاصة بالشريط المقيم الجديد - ويعرف بالمادة (المركبة) primer - أو ما إن يتم تعرف نقطة البدء هذه من قبل إنزيم الليغاز كشريط تزاوجي - تنامي - حتى يتم الكشف عن تسلسل القالب.

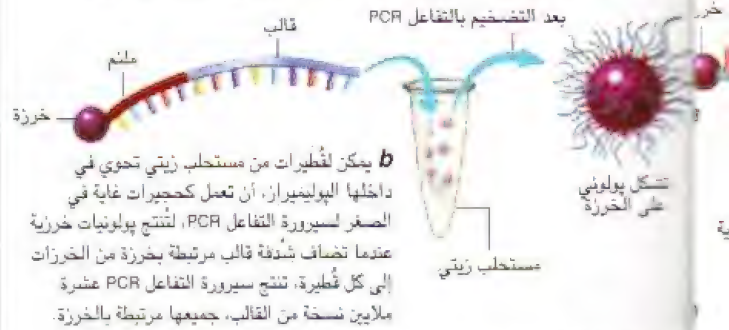
وغني عن البيان أن طرائق الكشف هذه تتفاوت بين المجموعات البحثية، ولكنها جميعها تستعمل بالتأكيد نمطا من نمطين إشاريين فإذا ما تم ربط جزئي فلوري fluorescent بالقواعد المضافة، فإنه يمكن رؤية الإشارة اللونية بمجهر ضوئي. ويتم استعمال كشف الفلورة fluorescence في كل من سيرورتي إطالة القواعد base-extension وسلسلة الربط ligation sequencing، من قبل مجموعات بحثية كثيرة، بما في ذلك M، مزكر و زملاؤه [في جامعة بيلور] و R، ميترا [في جامعة واشنطن بسانت لويس] ومن قبل (١) ما يحدث فعلاً أن الشريط - نظرا إلى ضالة حجمه نسبة إلى الإنزيم - هو الذي يعبر نفقا في جزئي الإنزيم، ويتم التركيب (٢) هو شريط (أو شدة) الدنا، الذي يتم تركيب شريط (أو شدة) متمم له بالتقابل بوساطة إنزيم بوليميراز الدنا في الطور S من الدورة الخلوية، أو في المختبر، فهو يدل الإنزيم على التسلسل الذي يُعتمد بناؤه، ويرشده إلى وضع النكليوتيدات المتممة بالتقابل

## التضخيم

بالنظر إلى أنه يصعب الكشف عن الإشارة الضوئية الصادرة عن مجرد جزئي مفرد من الدنا، فإن تفاعلات إطالة القواعد أو تفاعلات الربط غالبا ما تُجرى على نحو متزامن على ملايين النسخ لشريط القالب نفسه. وتتطوي الطرائق اللاخوية (a و b) لصنع هذه النسخ، في إجراء سيرورة التفاعل PCR على مقياس ضخم.

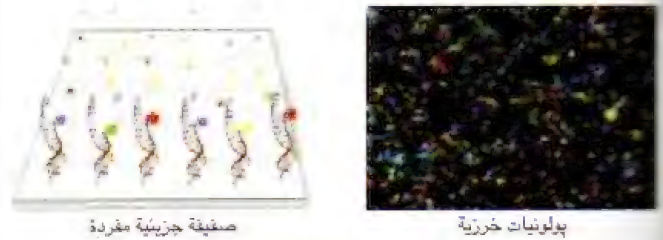


٢ بولونيئات - مستعمرات إنزيم البوليميراز - تم إنشاءها مباشرة على سطح شريحة مجهرية، أو سطح هلامية gel. يحوي كل منها بادئة بإمكان شدة القالب أن تعثر عليها وترتبط بها. تنتج سيرورة التفاعل PCR ضمن كل بولونية تعقداً يحوي ملايين نسخ القوالب.



## بناء المضاعفات

إن سلسلة الآف أو ملايين الشدة القالبية على نحو متوازن، يزيد سرعة السلسلة إلى الحد الأقصى. ويمكن في نظام إطالة قاعدة جزئي مفرد، وباستخدام كشف إشارة فلورية، مثلا، صنع مئات الملايين من شدة قوالب مختلفة على صفيحة مفردة (الشكل السفلي في اليسار). وفي طريقة أخرى، يتم تجميد ملايين البولونيئات الخزنية على سطح هلامية خاصة. بغية السلسلة المتزامنة بطريقة الربط، وبالإشارات الفلورية، تظهر في الصورة السفلية اليمنى، التي تمثل 0.01 في المئة من المساحة الكلية للشريحة المجهرية.



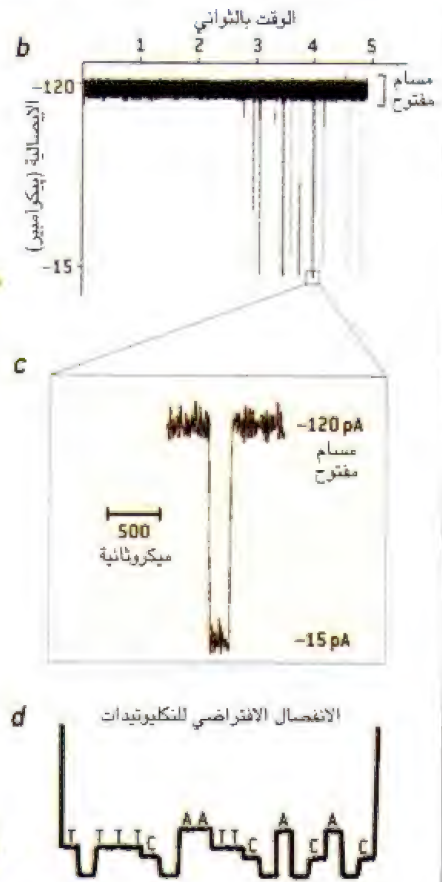
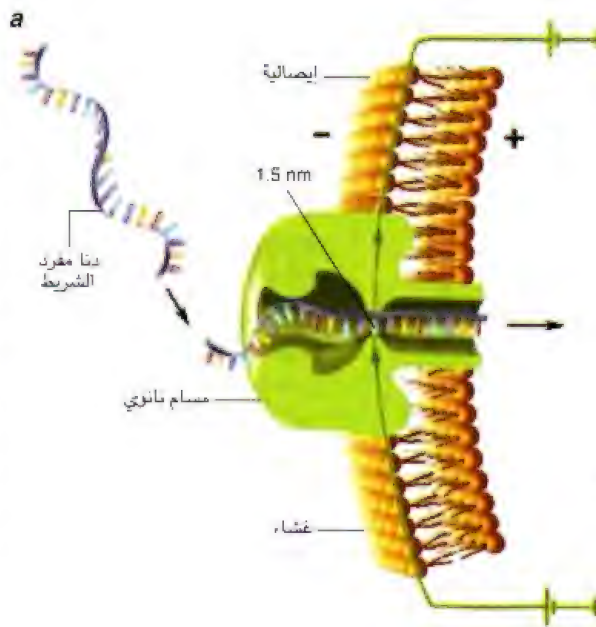
يمكن بوساطتها أن نرى هذه البنى الفائقة الصغر، ونميز بعضها من بعض. ولكن قراءة ملايين أو بلايين القواعد، تعني قطعاً أن على معظم تقانات السلسلة أن تعتمد في مرحلة ما على الكيمياء. وصارت الطريقة، التي طورها «F. سانكر» في السبعينات، هي المتبعة على نطاق واسع في مشروع الجينوم البشري (HGP). ولا تزال العنصر الأساسي لمعظم أعمال السلسلة التي تُجرى حالياً. وتوصف التقنية أحيانا بأنها السلسلة بالفصل، وتتطلب دورات عديدة من التضاعف لإنتاج أعداد كبيرة من نسخ من المد الجينومي موضع الاهتمام. وتنتج الدورة الأخيرة نسخة من شدة متغايرة



## السلسلة النانوية المسام

يتم في هذه التقنية، على غرار الرحلان الكهربائي، سحب الدنا باتجاه شحنة موجبة. ولكي يصل تلك النقطة، على الجزيء أن يعبر غشاءً من خلال مسام (ثقب)، يبلغ قطره الأضيق 1.5 نانومتر (nm)، سيسمح فقط لشريط دنا منفرد أن يمر عبره (a). وعند مرور شريط الدنا عبر المسام، تسد النكليوتيدات الفتحة بلحظة خاطفة، وهذا يغير من الإحصائية الكهربائية للغشاء، التي تقاس بالبيكوامبير (pA). وتنتج الفروق الفيزيائية بين الأنماط الأربعة للقواعد عوائق مختلفة الدرجات والدوام (b). ويظهر فحص دقيق لقياس حادثة الإحصاء (الإعاقبة) تغييراً في الإحصائية عند مرور شريط طوله 150 نكليوتيداً

لنمط واحد من القواعد عبر المسام (c). وبإدخال تحسينات على هذه الطريقة لرفع ميزتها لقواعد منفردة، يمكن أن تنتج فصلاً لتسلسل القواعد بعضها عن بعض - كما هو موضح في المثال الافتراضي المبين في الأسفل (d)، وهذا سيسفر عن تقنية سلسلة بوسعها أن تقرأ كامل الجينوم البشري في خلال 20 ساعة فقط، بمناى عن خطوات التسخ والتفاعلات الكيميائية المكلفة



في الكشف. ولهذا السبب فإن معظم مجموعات البحث، يعتمد أولاً إلى نسخ، أو تضخيم، قالب الدنا المفرد المعني، بسيرورة تعرف بتفاعل سلسلة البوليميراز (PCR) polymerase chain reaction. وبرز في هذه الخطوة أيضاً تنوع من المقاربات، جعل أمر استعمال البكتيرات<sup>(1)</sup> لتوليد نسخ من الدنا غير ضروري.

ووفقاً لطريقة تضخيم لاخلوية طورها <كاواشيما> [من معهد سيرونو لأبحاث الصيدلانيات في جنيف] و<A> شيتقيرين< [من الأكاديمية الروسية للعلوم] و<ميتر> [عندما كان في هارفر] يتم إنشاء مستعمرات منفردة من البوليميراز Individual colonies of polymerase (بولونييات<sup>(2)</sup> polonies) تُنشر طليقة كصفيفات على سطح شريحة مجهرية، أو على سطح طبقة من الهلامية gel. ويخضع جزيء قالب الدنا المفرد داخل كل بولونية للتفاعل PCR، وهذا يؤدي إلى إنتاج ملايين النسخ، التي تنمو في الواقع مثل مستعمرة بكتيرية، من القالب الأصلي المركزي. ولأن كل تجمع بولوني ناتج يكون عرضه

المختبر الخاص بي في كلية طب هارفرد، ومن قبل أجنكورت بيوساينس كورپوريشن Agencourt Bioscience Corporation. وتستعمل طريقة بديلة بروتينات ضيائية أحيائية bioluminescent proteins، كإنزيم اللوسيفيراز لليراعة<sup>(3)</sup> firefly، وذلك لكشف مركب بيروفسفات الذي يتحرر عند ارتباط قاعدة بشريط البادنة. ويستعمل هذا النظام، الذي طوره <M> روناكي< [ويعمل في جامعة ستانفورد] كل من شركتي بيروسيكونسينك/بيوتاكو و454 لايف ساينسز.

ويتطلب عادة كلا شكلي الكشف شواهد متعددة لتفاعل المزاجية لكي يحدث في اللحظة ذاتها، كي يصدر إشارة على درجة من القوة بحيث يمكن رؤيتها، وبذلك يمكن اختبار كثير من نسخ التسلسل المعني على نحو متزامن. ولكن بعض الباحثين يعمل حالياً على طريقة، تُكشف بوساطتها إشارات فلورية، تصدر عن جزيء واحد فقط للشريط القالب. ويتبنى مقاربة الجزيء المفرد هذه كل من <S> كوك< [من معهد كاليفورنيا للتقانة] وعلماء في شركتي هيليكوس بيوساينسز ونانوفلويديكس، بهدف اقتصاد الوقت والتكلفة، وذلك باستبعاد الحاجة إلى صنع نسخ من القالب الذي ستم سلسلة.

وينطوي كشف جزيئات فلورية مفردة على كثير من التحدي، لأن ما يقرب من خمسة في المئة يفقد خلال الكشف، ولا بد عندئذ من أخذ «قراءات» أكثر لتلافي أخطاء الفجوات الناجمة عن هذا الإخفاق.

Nanopore Sequencing (١)

(١) اليراعة: ليست ذباباً على الإطلاق، وإنما هي من الحشرات الغمدية الأجنبية التي تضم الخنافس والسوس [انظر: «كيف تضيء اليراعات ولماذا؟»، <العلوم> العددان 7/6 (2006)، ص 82]

(٢) ومفردها بولونية

(٣) ومفردها بكتيرة

(التحرير)



## مشروع الجينوم الشخصي<sup>(١)</sup>



يُعدُّ «M.G. تشرش»، الذي يظهر هنا مع بولونيات فلورية، واحداً من مجموعة متطوعين يخططون لكشف جينوماتهم للفحص العلني.

زمن بعيد إجراء اختبار متابعة لمداواتي للكونترول. لقد أدت هذه المعلومة المقيدة إلى تعديل الجرعة والغذاء، ومن ثم إلى تخفيض درامي لنمط واحد على الأقل من المجازفة، ولن تكون هذه التجربة في المستقبل منوطة بموهبة تأتي عبر القارة (الأمريكية)، بل يمكن أن تولد صناعة جديدة، يقوم بها طرف ثالث، لأدوات برمجة جينومية.

ولقد حظي المشروع PGP بموافقة مجلس التقويم الداخلي لكلية هارفرد، وكجميع الأفراد الذين تتناولهم الأبحاث على الإنسان، فإنه يجب توضيح الأخطار الكامنة للمشاركين قبل أن يوافقوا على توفير البيانات الخاصة بهم. وسيكون بوسع كل متطوع يُعَبَّأ لبرنامج PGP أن يراجع أيضاً التجارب الخاصة للأفراد السابقين قبل أن يعطي موافقة واعية. وستكون الطبيعة المكشوفة للبرنامج، بما في ذلك التعريف الكامل بالأفراد وبياناتهم، أقل خطراً على كل من الأفراد والبرنامج من الطبيعة البديلة التي تُعد بالخصوصية والسرية، وتكون عرضة لمخاطر النشر العرضي للمعلومات، أو بإمكان الوصول إليها من قبل المسللين.

ومثلما سياسة حرية الوصول المجانية للبيانات، التي أنتجها مشروع الجينوم البشري (HGP)، فإن مكشوفية المشروع PGP مصممة لزيادة كمون الاكتشاف إلى الحد الأعلى. وإضافة إلى توفيره موارد علمية جديدة، يقدم البرنامج تجربة لحرية الوصول العلنية ولتغطية التأمين. وسيساعد المانحون الخصوصيون في المراحل المبكرة للبرنامج على ضمان وجود مجموعة متنوعة من الأفراد، تقف عائقاً أمام إمكان معاناتهم من تمييز وراثي نتيجة لاشتراكهم في البرنامج PGP. وتمتلك هذه الآلية، التي يحركها حب المرء لإخوانه في الإنسانية، حسنة أنها لا تحتاج في البداية إلى أن تكون ربحية. بيد أن شركات التأمين ستكون، مع ذلك، شديدة الاهتمام في نتيجة هذا المشروع.

يمكن العثور على تفاصيل المشروع PGP في الموقع: <http://arep.med.harvard.edu/PGP/>

الجيومية والفينومية الخاصة بهم متاحة للجميع. وستشمل هذه المواد تسلسلات كامل الجينوم (46 صبغياً) لكل متطوع، والسجلات الطبية الرقمية: إضافة إلى المعلومات التي يمكن أن تصبح يوماً ما جزءاً من السيرة الصحية الشخصية، كالبيانات الشاملة عن الرنا RNA والبروتينات ومقاييس الجسم والوجه والتصوير بالرنين المغناطيسي magnetic resonance imaging (MRI)، وأنماط التصوير الأخرى ذات الأهمية الحاسمة. وسنعمد أيضاً إلى إنشاء وإيداع سجلات خلوية بشرية، تمثل كل شخص، في مستودع كوريل التابع للمعهد الوطني للعلوم الطبية العامة National Institute of General Medical Sciences. ونهدف أيضاً إلى جعل جميع هذه المعلومات الخاصة بالجينومات والخلال سهلة المنال على نطاق واسع، ينقب فيها كل من يرغب ليختبر فرضياته وخوارزمياته (حساباته) الخاصة به، ولتكون مصدر الهام له، يستنبط بوساطتها فرضيات وخوارزميات جديدة.

وتزدونا حادثة جديدة بمثال بسيط لما يمكن أن يحدث. إن سجلات طبية قليلة من المشروع PGP - بما في ذلك سجلي الشخصي - متاحة على نطاق واسع في نظام على الخط online على الإنترنت، وهذا دعا أحد المختصين بأمراض الدم في الجانب الآخر من الولايات (الأمريكية) أن يلاحظ ويبلغني أنه كان علي منذ

يختبر كل رضيع يولد حالياً في الولايات المتحدة لمرض وراثي واحد على الأقل، هو بيلة الفينيل كيتون phenylketonuria، وذلك قبل أن يغادر المستشفى. كما يختبر بعض المرضى بسرطان الرئة لتباينات في جينة رمزها EGFR لمعرفة فيما إذا كان من المحتمل أن يستجيبوا للعقار إيريسا Iressa. ويتزايد استعمال الاختبارات الجينية، التي تشير إلى الكيفية التي سوف يستقلب metabolize بها المريض عقاقير أخرى، لتحديد الجرعة الدوائية. ويمكن التلميح فعلاً إلى أن بدايات أدوية تلائم كل شخص ستغدو ممكنة بجينومات شخصية رخيصة، فضلاً عن تزايد الحاجة إليها.

ونحتاج أيضاً، بعد الاهتمامات الصحية، إلى أن نعرف سلسلة نسبنا، فكم نسبنا قريب من «جنگيز خان»، أو بعضنا من بعض؟ إننا نرغب في معرفة تأثيرات الجينات مع جينات أخرى، ومع البيئة التي تشكل وجوهنا وأجسامنا وأمزجتنا وميولنا. وستجعل آلاف أو ملايين مجموعات البيانات، التي تشمل كامل جينوم الفرد وفينومه (طرازه المظهري) phenome - خلال التي تنتج من التعليمات المكوّدة في الجينوم - من الممكن البدء بحل بعض تلك المسائل المعقدة.

ومع هذا، فإن احتمالات نجاح هذا النمط الجديد من المعلومات الشخصية، التي أضحت متاحة على حين غرة، تبعث أيضاً على القلق إزاء كيفية سوء استعمالها المحتمل من قبل المؤمنين وأرباب العمل والقائمين على تنفيذ القانون بالقوة والأصدقاء والجيران وأصحاب المصالح التجارية والمجرمين.

لا يمكن لأحد أن يتنبأ بما سيكون عليه العيش في عصر الجينومات الشخصية حتى يوضع هذا كله موضع الاختبار. لهذا السبب بالذات، بادرت مع زملائي، حديثاً، إلى طرح مشروع الجينوم الشخصي (PGP) Personal Genome Project. ونأمل بهذه الخطوة الطبيعية التالية لمشروع الجينوم البشري Human Genome Project (HGP)، أن نستكشف الفوائد والأخطار للجينومات الشخصية بتعبئة متطوعين لجعل البيانات

على نحو متزامن.

وليست هذه الطرائق لتضخيم قالب والسلسلة بإطالة القواعد base extension أو بالربط ligation سوى أمثلة قليلة للمقاربات التي تتبناها دزينة من المجموعات والشركات البحثية الأكاديمية المختلفة للسلسلة بالتركيب sequencing by synthesis.

كما أن تقنية أخرى، وهي السلسلة بالتهجين، تستعمل الفلورة

ميكرونا واحداً وحجمه فمتولترا<sup>(٢)</sup> واحداً، فإن شريحة مجهرية مفردة، تستوعب على سطحها بلايين البولونيات

وإجراء تغيير في هذا النظام ينتج لأول مرة بولونية على خرزات غاية في الصغر، تتوضع داخل قطيرات ضمن مستحلب. ويمكن، بعد حدوث التفاعل، وضع ملايين من هذه الخرزات، التي تحمل كل منها نسخاً من قالب مختلف، في ثُقُر wells مستقلة في الشريحة، أو تثبيتها بوساطة هلامية، حيث تنجز السلسلة في الخرزات جميعها

(٢) الفمتولتر femtoliter: 10<sup>-15</sup> لتر.

(١) The Personal Genome Project (PGP)



لتوليد إشارة مرئية، وتستثمر، كما هي الحال في تقنية السلسلة بالربط، خاصة نزوع أشربة الدنا إلى أن تترايط (تتشافع) أو إلى أن تتهج مع التسلسلات المتممة لها وليس مع التسلسلات غير المترابطة. إن هذا النظام، الذي تستعمله الشركات أفيمتركس وبيرجن ساينسز Perlegen Sciences وإلومينا Illumina، والذي يبحث في المقام الأول عن التباينات في تسلسلات جينوم معروف، هو فعلا قيد الاستعمال التجاري الواسع الانتشار. ويتطلب هذا النظام تركيب أشربة مفردة قصيرة من الدنا في كل تضامنية ممكنة لتسلسلات القواعد ثم تنظيمها (تصنيفها) على شريحة كبيرة. وعندما يمرر محلول يحوي نسخا من الشريط القالب ذي التسلسل المجهول عبر هذه الصفيقة array، فإن هذه النسخ ستترابط بالتسلسلات المتممة لها. ويصدر أفضل تزاوج (ترابط) match الإشارة الفلورية الأكثر سطوعا. وتضيف الشركة إلومينا أيضا خطوة إطالة القواعد base extension لهذا الاختيار لنوعية التهجين hybridization specificity.

وتتناول تقنية أخيرة ذات واعدية مرموقة على المدى البعيد مقارنة مختلفة كلياً لتعرف أفراد القواعد في جزيء الدنا وتركز هذه

القواعد بكشف البيروفسفات في صفيقة من الثفر، وقرات كل مجموعة من المجموعتين الكمية نفسها من التسلسل: أي 30 مليون زوج من القواعد، في كل دورة run سلسة. وفي حين أن نظامنا قرأ نحو 400 زوج من القواعد في الثانية الواحدة، فإن نظام مجموعة 454 قرأ 1700 في الثانية. وتنطوي السلسلة عادة على أداء دورات متعددة لإنتاج تسلسل توافقي consensus أكثر دقة. ويتغطية قدرها 43 مرة (x 43): أي 43 دورة لكل قاعدة للجينوم المستهدف، فإن المجموعة 454 أنجزت دقة قدرها خطأ واحد في كل 2500 زوج من القواعد. أما مجموعة هارفر د فتوصلت إلى أقل من خطأ واحد في كل ثلاثة ملايين زوج من القواعد، ويتغطية قدرها 7 x (سبع مرات) وللمنابلة القوالب استعمل كلا الفريقين خرزات أسيرة capture، انعكس حجمها على كمية الكواشف الغالية المستهلكة، وكان قطر الخرزة التي استعملتها مجموعتنا ميكرونا واحداً، في حين أن المجموعة 454 استعملت خرزات قطر الواحدة منها 28 ميكرونا: في نُقْر سعة كل منها 75 بيكولتر (75 x 10<sup>-12</sup> لتر). إن وسطي تكلفة أفضل طرائق السلسلة المتاحة والقائمة على

## لدينا كثير من العمل وقليل من الوقت كي ترقى جاهزيتنا لمستوى الجينومات المنخفضة التكلفة.

الطرائق، التي جمعت كلها تحت عنوان السلسلة النانوية المسام nanopore، على الفروق الفيزيائية بين أنماط القواعد الأربعة، كي تنتج إشارة مقروءة. فعندما يمر شريط مفرد من الدنا عبر مسام قطره 1.5 نانومتر، فإنه يحدث تموجات في الإيصالية الكهربائية conductance للمسام. وينتج كل نمط من القواعد تغيراً طفيفاً مختلفاً في الإيصالية، يمكن استعمله لتعرفه [انظر الإطار في الصفحة 26]. إن هذه الطريقة، التي ابتكرتها <D> برانتون [من هارفر د] و<D> ديمر [من جامعة كاليفورنيا في سانتا كروز] لا تزال قيد التطوير من قبل الشركة أجيلانت تكنولوجيز Agilent Technologies وآخرين، حيث يتم إدخال تعديلات مهمة، مثل كشف إشارة التفلور.

### تخفيض التكلفة<sup>(1)</sup>

إن تقويم أنظمة الجيل التالي للسلسلة هذه بمقارنة بعضها ببعض وبطريقة «سانكر» يوضح بعض العوامل التي ستؤثر في مدى نفع كل منها. فمثلاً، نشرت مؤخراً مجموعتان بحثيتان، الأولى مجموعتي في هارفر د والثانية من الشركة 454 لايف ساينسز، توصيفات مُحْكَمَة لشاريع مقياس سلسلة الجينوم، تسمح بالمقارنات المباشرة. فلقد وصفت مع زملائي سلسلة بنظام الربط، تستعمل تضخيم خرزات بولونية polony لدنا القالب، ومجهر رقمي عادي لقراءة إشارات التفلور. واستعملت مجموعة 454 تقنية مماثلة من التفاعل PCR في مستحلب الزيت للتضخيم، متبوعة بسلسلة إطالة

الرحلان الكهربائي هو دولار واحد لكل 150 زوجاً من القواعد في كل تسلسل منجز. ولم تنشر المجموعة 454 التكلفة على أساس المشروع، لكن فريق هارفر د أنجز تسلسلاً بتكلفة دولار واحد لكل 1400 زوج من القواعد، وهذا يمثل تخفيضاً في التكلفة قدره تسعة أمثال. ويتوقع قريباً جداً أن تخفّض هذه التقنيات الجديدة وغيرها تكلفة سلسلة البلايين الستة لأزواج القواعد لجينوم أي منا إلى مئة ألف دولار. وستتوقف محاولة تخفيض التكلفة إلى قيمة أقل في أي جيل تال من طرق السلسلة على بضعة عوامل أساسية، وبالنظر إلى أن الأتمتة أضحت حالياً أمراً مألوفاً في الأنظمة كافة، فإن الإنفاق الأكبر سيكون على الكواشف الكيميائية والتجهيزات. ولقد خفّضت النمنمة miniaturization فعلاً استعمال الكواشف بالقياس إلى تفاعلات «سانكر» التقليدية بمقدار بليون ضعف أي من ميكروتر (10<sup>-6</sup> لتر) إلى فمتولتر (10<sup>-15</sup> لتر).

ويمكن لأجهزة تصوير تحليلية عديدة أن تجمع بيانات أولية بمعدلات تصل إلى بليون بايت (جيجابايت gigabyte) في الدقيقة الواحدة، ويمكن لحواسيب أن تعالج المعلومات بسرعة قدرها بلايين عديدة من العمليات في الثانية. لذا، فإن أي جهاز تصوير مقيد بسيرورات فيزيائية أو كيميائية بطيئة، كالرحلان الكهربائي أو التفاعل الإنزيمي، أو أي نظام غير مرزوم رزماً محكماً في الحيز أو الزمن، ويحصي كل خرزة pixel من الخرزات، سيكون بالتوازي ذا تكلفة تشغيل عالية، لكل وحدة قاعدة دنا يتم تحديدها

Lowering Cost (+)



بسلسلته كان فسيفساء لصبغيات عدة أفراد من الناس). ولكن كثيرا من الأسئلة الرئيسية حقا لا يزال قائما، مثل الكيفية التي نضمن بها الخصوصية والعدالة في استعمال المعلومات الجينية الشخصية من قبل العلماء وشركات التأمين وأرباب العمل والمحاكم والمدارس ووكالات التبني والحكومة والأفراد الذين عليهم أن يتخذوا قرارات سريية وإنجائية (توالدية).

وتحتاج هذه الأسئلة الصعبة والمهمة إلى أن تُبحث بصراحة مثل أوجه الاكتشافات التقنية والبيولوجية للجينومييات genomics البشرية. وبهذا القصد، استهلكت مع زملائي برنامجا جينوميا شخصيا Personal Genome Project [انظر الإطار في الصفحة 27]، للبدء باستكشاف الأخطار الكامنة، ومزايا العيش في عصر الجينومييات الشخصية.

وعندما نستثمر في أسهم أو ملكيات ثابتة أو علاقات، فإننا ندرك سلفا أنه ما من شيء موثوق. ونفكر احتماليا في الأخطار مقابل القيمة، مدركين مسبقا أن الأسواق معقدة كالحياة. وتاما مثل ما أحدثته في التقانات الرقمية الشخصية من ثورات اقتصادية واجتماعية وعلمية، لم يكن لأحد أن يتصورها عندما استعملنا الحواسيب القليلة الأولى، علينا أن نتوقع ونهين أنفسنا لتغيرات مماثلة، وذلك في الوقت الذي نرتحل فيه إلى الأمام، منطلقين من جينوماتنا القليلة الأولى.

Raising Value (x)

(1) غفلا من الاسم (غير منسوب لغزو بعينه).

## المؤلف

George M. Church

استاذ الوراثة في كلية طب هارفرد، ومدير مركز هارفرد-ليبير للوراثة الحاسوبية التابع لمختبر الثقة الجينومية في وزارة الطاقة الأمريكية، ومراكز التميز لعلم الجينومات التابعة للمعاهد الوطنية للصحة. وتجسّر أبحاثه وتكامل تقانات تحليل وتطبيق الجزيئات الأحادية والخلايا. يملك عشر براءات اختراع أمريكية، وقد عمل مرشدا علميا لأكثر من عشرين شركة.

## مراجع للاستزادة

Advanced Sequencing Technologies: Methods and Goals.

Jay Shendure, Robi D. Mitra, Chris Varma and George M. Church in *Nature Reviews Genetics*, Vol. 5, pages 335-344; May 2004.

How Sequencing Is Done. DOE Joint Genome Institute, U.S. Dept. of Energy, Office of Science, updated September 9, 2004. Available at [www.jgi.doe.gov/education/how/index.html](http://www.jgi.doe.gov/education/how/index.html)

NHGRI Seeks Next Generation of Sequencing Technologies. October 2004 news release available at [www.genome.gov/12513210](http://www.genome.gov/12513210)

Accurate Multiplex Polony Sequencing of an Evolved Bacterial Genome. Jay Shendure et al. in *Science*, Vol. 309, pages 1728-1732; September 9, 2005.

Genome Sequencing in Microfabricated High-Density Picolitre Reactors. Marcel Margulies et al. in *Nature*, Vol. 437, pages 376-380; September 15, 2005.

*Scientific American*, January 2006

ويتمثل اعتبار آخر في الحكم على تقانات السلسلة الناشئة بكيفية استعمالها. وتنزع الطرائق الجديدة إلى تبني قراءة تسلسلات قصيرة؛ يراوح طولها ما بين 5 و 400 زوج من القواعد مقارنة بطول 800 زوج من القواعد في القراءة النمطية في تقنية «سانكر»، ولذلك تكون سلسلة قطع الدنا، ووضعها متتالية بعضها في إثر بعض لجينوم غير معروف مسبقا بدءا من لا شيء، أكثر صعوبة في التقانات الجديدة. ولكن إذا كان الطب هو المحرك الرئيسي لسلسلة واسعة النطاق، فعلى عندئذ أن نعيد سلسلة الجينوم البشري للبحث عن اختلافات ضئيلة جدا في دنا الأفراد. ولن تمثل، والحالة هذه، قراءة أطوال التسلسلات القصيرة مشكلة تقنية.

وستكون أيضا متطلبات الدقة من وظائف التطبيقات. فقد تتطلب الاستعمالات التشخيصية تخفيضاً لمعدلات الخطأ إلى ما دون المعيار الحالي الذي يستعمله مشروع الجينوم البشري HGP وهو 0.01 في المئة؛ لأن هذا المعيار مازال يتيح الفرصة لـ 600 000 خطأ في كل جينوم بشري. ومن جهة أخرى فقد ثبت أن معدلا عاليا من الخطأ (4 في المئة) في اعتيان sampling عشوائي للجينوم يكون مفيدا في اكتشاف الأنماط المختلفة للـ RNA وللنسخ. وفي تصنيفها. كما أن استراتيجيات مماثلة «قسرية» shotgun تطبق في الاعتيان البيئي، حيث إن عددا ضئيلا مثل 20 زوجا من القواعد، يكفي لتعرف كائن حي في نظام بيئي.

## إعلاء القيمة

ولدينا، وراء تطوير هذه التقانات الجديدة للسلسلة، كثير من العمل لننجزه، في خلال فترة قصيرة من الوقت كي ترقى جاهزيتنا لحلول عصر قراءة الجينوم المنخفض التكلفة. وستكون هناك حاجة إلى برمجيات لمعالجة معلومات التسلسل كي تصبح، على سبيل المثال، طيبة للأطباء. وسيحتاجون إلى طريقة، تُشتق بوساطتها قائمة بالأولوية ذات الطابع الفردي لكل مريض فيما يتعلق بالاختلافات الجينية العشرة الأولى، أو نحو ذلك، التي يرجح أن تكون مهمة. وسيكون جوهرها على حد سواء تقييم تأثيرات الإثابة الواسعة النطاق لهذه التقنية لدى الناس.

لقد أقام المشروع HGP منذ استهلاله برنامجا بتكلفة عشرة ملايين دولار سنويا لدراسة القضايا الأخلاقية والقانونية والاجتماعية، التي ستطرحها سلسلة الجينوم البشري، والتصدي لإشكالاتها، واتفق المشاركون في هذا المسعى على جعل بياناتنا جميعها متاحة علانية بسرعة غير مسبوقه - في خلال أسبوع من الاكتشاف، ووقفنا في وجه المحاولات التي تسعى إلى الاتجار بالطبيعة البشرية. ووجّه اهتمام خاص إلى حماية الغُفلية anonymity لجينومات الناس (إن «الجينوم البشري» الذي قمنا



## 30



سببها استمرار عملية الالتهاب، وآلام السرطان المتقدم المعقدة تحصل من تواصل تخرب النسيج المصاب والتهابها.

وفي حالات أخرى ينتج الألم المستمر من تآذي الخلايا العصبية نفسها، مثلما يحصل عندما تتخرب خلايا الجهاز العصبي المركزي [الدماغ والنخاع الشوكي] بسبب التصلب المتعدد multiple sclerosis أو بسبب ضربة دماغية أو بسبب رض في النخاع الشوكي. كذلك يمكن حصول الألم المستمر من آذية الخلايا العصبية المحيطة، مثلما هي الحال في الذين يتعرضون لبرق في

الحساسية قد تأخذ شكل ردود فعل مفرطة تجاه مصادر ألم عادية<sup>(\*)</sup>، أو شكل تألم من عوامل غير ضارة عادة<sup>(\*\*)</sup>، وفي الشكل الأخير يمكن حتى لاحتكاك الثياب العادي مع الجلد، أو ثني أحد المفاصل، أن يتسبب في ألم غير محتمل للمريض.

وقد أدرك علماء الأحياء اليوم أن هذه الحساسية المفرطة تنجم عن تغيرات عضوية في الخلايا العصبية على مستوى الجزيئات، ففي محيط الجسم مثلاً قد تؤهب بعض الجزيئات المحرصة على الالتهاب في مستقبلات الألم الكاشفة للأذيات، قد تؤهبها

ومهما تكن الآلية المسؤولة، فقد أصبح معلوماً أن الألم المستمر يمكن أن يؤدي إلى زيادة التحسس، ومن ثم إلى تفاقم الشعور بالألم وطول بقائه؛ لذلك صار موضوع تلطيف ردود الفعل المفرطة تجاه المنبهات من أهم ما يفكر فيه الإخصائيون وهم يبحثون عن علاجات مضادة للألم جديدة، وعلى المرضى في هذه الأثناء أن يدركوا أنهم غير ملزمين بتحمل الآلام المعقدة، وأن يسعوا إلى معالجتها حثيثاً لدى الإخصائيين كي يتفادوا مشكلة فرط الحساسية.

## على المرضى أن يدركوا أنهم غير ملزمين بتحمل الآلام المعقدة وأن تلك الآلام يلزمها معالجة جذرية.

### لنبدأ من الأول<sup>(\*\*\*)</sup>

لقد توجه الإخصائيون في محاولاتهم اكتشاف أدوية جديدة مضادة للألم إلى المكان الذي تصدر عنه معظم الإشارات الآلية: محيط الجسم. فبعض الجزيئات المختصة التي تستخدمها مستقبلات الألم للكشف عن المنبهات المؤذية يندر أن توجد في غير هذه المناطق؛ لذلك إن تمكنا من إعاقة عمل هذه الجزيئات، أغلقنا الطريق على إشارات الألم من دون تعطيل عمل وظائف الجسم الفيزيولوجية الأخرى، أي من دون تسبب مضاعفات جانبية غير حميدة.

ومعظم علاجات الألم الشائعة اليوم - كالأسبرين ومضادات الالتهاب اللاستيرويدية (NSAID) الأخرى - تؤدي وظيفتها السحرية في المحيط، فإذا أوزيت ناحية من محيط الجسم، ضُخَّت خلايا النسيج المتآذية مركبات كيميائية تدعى بروتاغلاندينات prostaglandins، تعمل على خفض عتبة ردود الفعل عند فروع مستقبلات الألم التي تستشعر حس

لأن تبالغ في التفاعل مع تلك المنبهات. بل قد تجعلها ترسل إشارات للدماغ من دون وجود أي مؤثر بيئي.

كذلك قد تنجم حساسية للمنبهات من تبدلات تحصل في الجهاز العصبي المركزي تولد فعالية مفرطة في الطرق العصبية الناقلة للألم. هذه التبدلات التي يمكن أن تستمر فترات طويلة، قد تشمل عرض أعداد متزايدة من المستقبلات التي تستجيب للنواقل العصبية التي تحررها مستقبلات الألم، وقد تشمل حتى إعادة صياغة الاتصالات العصبية، أو فقدان فعالية الخلايا العصبية التي عادة ما تكبح إشارات الألم. وعندما تحصل التبدلات المؤدية إلى فرط الحساسية في الجهاز العصبي المركزي ندعو الحالة «حساسية مركزية».

الساق ويعانون ما يسمى ألم الطرف الشبحي phantom limb pain، أو الذين يشكون من ألم جلدية حارقة تبقى مستمرة عدة سنوات بعد انتهاء إصابتهم بنوبة من عدوى (خُمج) الحلا herpes infection. جميع هؤلاء يعانون آلاماً ذات منشأ عصبي، وهنا لا يكون الألم المستمر كناية عن تواصل آذية أو مرض في أحد الأعضاء، إنما يكون علة في الجهاز العصبي نفسه تستوجب عناية طبيب مختص بعلاج الألم.

### الألم لا ينتهي<sup>(\*)</sup>

ولعل المخرج المشترك الأعظم لكثير من الآلام المعقدة على المعالجة هو حساسية المريض غير الطبيعية للمنبهات. وهذه

### نظرة إجمالية/ تخفيف الألم<sup>(\*\*)</sup>

- هناك خلايا عصبية مخصصة (تدعى مستقبلات الألم) تستجيب للمنبهات المؤذية. وهذه الخلايا تنقل رسالة الألم إلى خلايا عصبية أخرى في النخاع الشوكي، ترسل بدورها الإشارة إلى الدماغ.
- تمتلك مستقبلات الألم وخلايا عصبية أخرى في دارات الألم جزيئات خاصة للكشف عن المنبهات المسببة للألم، وهذه الجزيئات يمكن أن تستخدم أهدافاً لعقاقير قيد التطوير مهمتها تخفيف الألم بأثار جانبية أقل من تلك التي تحصل من العقاقير المتوافرة حالياً.

Pain without End (\*)

Overview/ Easing Pain (\*\*)

Start at the Beginning (\*\*\*)

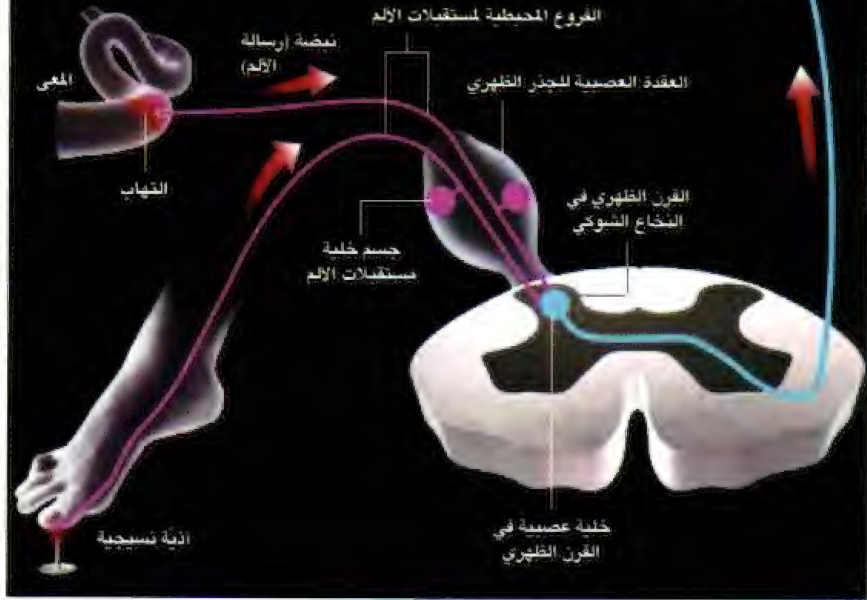
hyperalgesia (١)

allodynia (٢)



## الشعور بالألم<sup>(١)</sup>

إن دارة الألم (المصورة هنا بشكل مبسط) تمتد من محيط الجسم (الجلد والنسج الأخرى خارج الجهاز العصبي المركزي) إلى النخاع الشوكي والدماغ. فالمنبهات المؤلمة تنشط خلايا عصبية خاصة تستشعر الألم (مستقبلات الألم - اللون الأزرق)، وهذه بدورها تولد نبضات تحمل رسالة الخطر إلى الخلايا العصبية في القرن الظهري للنخاع الشوكي (اللون الأزرق). أخيراً تبعث هذه الخلايا بالرسالة إلى الدماغ الذي يفسرها حساً بالألم.



أدوية تعمل على إزالة الألم بشكل انتقائي. ولعل مستقبلية الكابسيسين capsaicin هي الأكثر إثارة من بين هذه الأهداف؛ إذ إن هذه القناة الأيونية الموجودة في غشاء كثير من خلايا مستقبلات الألم لا تتجاوب فقط مع المادة كابسيسين، وهي المادة الفعالة في الفليفلة الحارة (الحادة)، وإنما للحرارة الشديدة وللبروتونات protons، وهي أيونات (شوارد) الهيدروجين التي تجعل المأكولات حامضة. ومن المعروف أن البروتونات توجد في النسج الالتهابية بكثرة، فبحضور هذه المركبات الكيميائية أو بوجود حرارة مرتفعة فوق 43 درجة مئوية، تسمح هذه القناة بمرور أيونات الصوديوم والكالسيوم بكثرة عبر غشاء الخلية إلى مستقبلات الألم، وهذا يحفزها على توليد إشارة تترجم إلى حس بالحرق تسببه الحرارة أو الالتهاب أو الأطعمة الحريفة (الحادة المذاق).

لذلك من المتوقع أن المواد التي تكبح مستقبلات كابسيسين من شأنها أن تُخمد ألم الالتهاب. وبالفعل ثبت في مختبر الحيوانات أن تلك المواد المضادة يمكنها أن تُسكن الألم الشديدة الناتجة من البيئة الحامضة التي تحيط بالأورام المتقدمة التي انتقلت إلى العظام وخربتها. ولا عجب إذاً أن شركات أدوية كثيرة تتنافس اليوم على اختراع مضادات لمستقبلات كابسيسين.

ولا تقتصر معالجة المستقبلات على هذا الأمر، فقد تبين - مما يثير الدهشة - أن إثارة مستقبلات كابسيسين عمداً بدلاً من كبحها يمكن في بعض الحالات أن يخفف الألم، ولذلك أخذ الأطباء يصفون مراهم تحوي المادة كابسيسين للراحة من ألم الحراك، أو إحساسات اللسع التي ترافق التئام الجروح، أو تلف الأعصاب الناتج من داء السكري، أو الحلا (الهربس) أو عدوى الإيدز HIV infection، ومع أن سبب الاستفادة من هذه المراهم غير واضح حتى الآن، فالتعرض الطويل لجرعات خفيفة من الكابسيسين يمكن أن يثبط حساسية

المعنى، فإن تثبيطه من شأنه ألا يسبب الخلل الوظيفي الذي تسببه العقاقير NSAID الشائعة التداول، ولو أنه غير مثبت حتى الآن كونها ألطف من هذه الأخيرة على غشاء المعدة. إلا أن العقاقير الجديدة ثبت أن ثمة مشكلات خاصة بها، فالعقار روفيكوكسيب Rofecoxib المعروف تجارياً باسم فيوكس Vioxx - وهو من مثبطات الإنزيم COX-2 التي شاع وصفها لألم التهاب المفاصل - سحب من الأسواق عندما تبين أن استخدامه يترافق مع ازدياد احتمال حدوث السكتات القلبية والدماغية. وتدرس حالياً احتمالات الضرر في استعمال مثبطات أخرى للإنزيم COX-2.

### عليك بالأطعمة الحريفة<sup>(٢)</sup>

لقد أدى اكتشاف أهداف علاجية توجد على مستقبلات الألم لوحدها، إلى تصنيع

الانزعاج وما يفعله الأسبرين والمركبات NSAID هو كبت لفعالية مجموعة من الإنزيمات تدعى سايكلو أوكسجينازات cyclooxygenases تستخدمها الخلايا لتوليد البروستاغلاندينات. وهذه العقاقير التي تباع من دون وصفة over-the-counter تسكن أوجاع وآلام الكثيرين كل يوم، لكنها تثبط توليد البروستاغلاندينات في نواح أخرى من الجسم، وهذا يؤدي في كثير من الأحيان إلى آثار جانبية غير حميدة، مثل ألم المعدة والإسهالات والقرحة الهضمية. وهي مضاعفات كثيراً ما تمتنع استخدام هذه العقاقير لفترات طويلة، كما تحد من حجم الجرعات التي تعطى منها.

ومن أجل تخفيف هذه المضاعفات الهضمية اخترعت شركات الأدوية مجموعة من العقاقير التي تستهدف الإنزيم سايكلو أوكسجيناز 2 (COX-2)، ولما كان هذا الإنزيم لا يعمل عادة في المعدة أو في

Feeling The Pain (١)  
Send in the Salsa (٢)

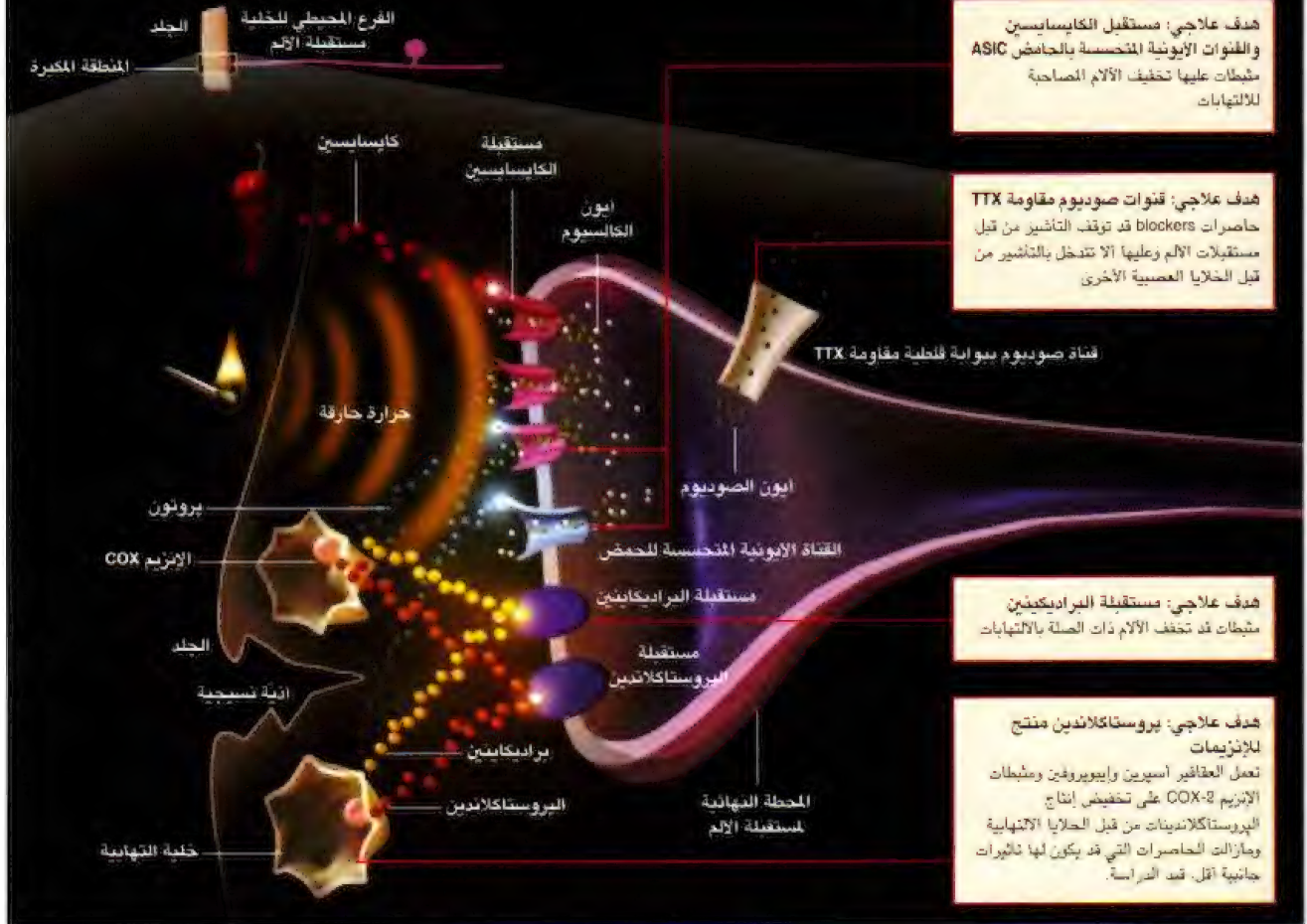
(١) ج. أمعاء.



## أهداف علاجية في محيط الجسم

والكالسيوم إلى داخل الخلايا، وهذا يُفعل مستقبلات أخرى تحرض بدورها الخلايا مستقبلات الألم على إرسال إشارات الألم وتجعلها تستجيب بشكل مفرط لمنبهات عادية وغير مؤذية. كذلك يحتاج استئثار حرك الإشارة إلى تفعيل القنوات الأيونية؛ لذلك يعتبر تثبيط فعالية الجزيئات الكاشفة أو القنوات الأيونية إجراء علاجيا كما هو مبين في المربعات. وقد بينا فقط بعض الأهداف العلاجية التي تجرب حاليا لإبقاء الرسم واضحا.

إن الفروع الصغيرة لخلايا مستقبلات الألم التي تعصب الجلد والأعضاء الداخلية تمتلك جزيئات مختصة (مستقبلات) يمكنها كشف المنبهات المؤذية. هذه المنبهات تشمل مادة الكايسايسين الكيميائية في الغليظة الحادة، والحرارة المرتفعة، والمواد التي تحررها خلايا الالتهاب التي تستجيب للأذية. فإذا تعرفت الكواشف هذه المنبهات، دفعت أيونات الصوديوم



لكن الخلايا العصبية المختصة باستشعار الألم تحوي نوعا فرعيا من قنوات الصوديوم، يعرف بالنمط المقاوم TTX، لا يوجد في الجهاز العصبي المركزي. ويأمل الباحثون لذلك أن يستطيعوا استخدام أدوية تعترض هذه القنوات الفرعية جهازيا (عن طريق الجسم كله) ومن دون مضاعفات تذكر؛ ثم إنه وُجد من بعض الدراسات أن مثل هذه الأدوية بإمكانها إخماد الفعالية

استجابة لتغيرات في القللية (القوة المحركة الكهربائية) voltage عبر غشاء الخلية، وهذا يولد نبضات تنقل رسائل بين خلية عصبية وأخرى مجاورة لها. وباستطاعة المخدرات الموضعية التي تُهدم الحركة عبر قنوات الصوديوم هذه مؤقتا أن تعالج أنواعا مختلفة من الألم، وبخاصة تلك التي تحدث بعد مراجعة طبيب الأسنان، إلا أن هذه المخدرات يجب أن تطبق موضعيا في مكان الانزعاج (فتثبط قنوات الصوديوم في سائر الجهاز العصبي قد يؤدي إلى الوفاة).

المستقبلات، ويجعلها أقل استجابة للمنبهات العادية، أو أنه يستنفذ النواقل العصبية التي تحررها الخلايا مستقبلات الألم.

### لنتعرض القنوات الأخرى

وهناك نوع آخر من الجزيئات الموجودة على النهايات المحيطية للخلايا مستقبلات الألم أخذت تثير اهتمام الإخصائين كهدف علاجي. فجميع الخلايا العصبية تحوي قنوات يعبر منها أيون الصوديوم، تفتح

Drug Targets in The Periphery (+)  
Block Other Channels (\*\*\*\*)  
TTX-resistant type (x)



المفرطة وغير المستحبة للأعصاب المحيطية التي تعرضت للأذى، وبذلك يمكنها تلطيف الآلام ذات المنشأ العصبي. وللأسف، لم تستطع الصناعة الدوائية حتى الآن تطوير مثبطات انتقائية لمثل هذه القنوات الفرعية، ويرد ذلك جزئياً إلى أنها تشبه إلى حد كبير قنوات الصوديوم المستجيبة لـ TTX والموجودة بكثرة في الجهاز العصبي كله. إلا أنه يمكن إزالة هذه القنوات الفرعية انتقائياً بطريقة جديدة تدعى التداخل بالـ RNA interference. وتعتمد هذه الطريقة على إدخال جزيئات دقيقة في كائن حي تدعى جزيئات الرنا المتداخلة الصغيرة (small interfering RNAs (siRNAs). وهذه الجزيئات تمنع إنتاج أحد البروتينات غير المرغوب فيه،

قادراً على تخريب مستقبلات البراديكاينين bradykinin، وهو بروتين صغير (بيبتيد) ينتج عند التهاب أحد نسيج المحيط، فمن المعروف أن البراديكاينين ينبه مستقبلات الألم بشدة، وإذا وجدت ضادة antagonist تعيق عمل مستقبلاته، فلابد لها أن تحجب تلك المستقبلات من تفعيل الخلايا مستقبلات الألم.. إلا أن هذه الضادة لن تمنع الخلايا العصبية من تعرف جزيئات أخرى محرّضة للألم تولدها الأذية أو الالتهاب، ومن الاستجابة لها - جزيئات مثل البروتونات والبروستاغلاندينات، وبروتين آخر يدعى عامل نمو الأعصاب. كذلك قد لا نستطيع تلطيف الآلام التي تنقلها جميع البروتونات من إعاقة مستقبلات الكايسايسين لوحدها،

يعترض نقل إشارات الألم لخلايا النخاع الشوكي العصبية، كذلك تجعل الأفيونات خلايا القرن الظهري (في النخاع الشوكي) أقل استجابة لإشارات الألم. ولأن هذه العقاقير تعمل على النخاع الشوكي يُتوقع نظرياً أن تعالج جميع أنواع الألم، لكنها بالفعل تعطي أفضل النتائج في الآلام الناتجة من عمليات الالتهاب.

إلا أن هذه المستقبلات الأفيونية توجد - مع الأسف - على الخلايا العصبية في كل أنحاء الجسم، بما في ذلك الدماغ والجهاز الهضمي. وهذا الوجود المعمم هو سبب حصول أنواع عديدة من المضاعفات الجانبية عند استخدام الأفيونات، مثل الإمساك وإعاقة التنفس، وهذا يحدد

## قد يستطيع الباحثون أن يطوروا علاجات نفسية أفضل لتغيير الإحساس بالألم.

بحثاً انحلال الجزيئات (النوات المرسلة) التي تدير عملية تركيب البروتين. هذه الطريقة قيد الدراسة حالياً في الإنسان لعلاج بعض الحالات المرضية في شبكة العين، لكن الاستفادة من طريقة التداخل بالرنا في تصنيع أدوية تمنع الألم ستشكل تحدياً صعباً للباحثين في الأغلب. فكما هي الحال بالمعالجة بالجينات، ستحتاج طريقة نقل جزيئات الرنا المتداخلة الصغيرة إلى استخدام فيروس (حمة راشحة)، وهذا مدعاة للقلق من ناحية السلامة. ولا بد من الانتظار لمعرفة فيما إذا ستكون هذه الطريقة عملية في علاجها للألم، لكن إمكانية ذلك تبقى مثيرة للباحثين.

لنفترض أن شركات الأدوية استطاعت أن تطور علاجاً سحرياً للألم: أي مركباً يزيل فعالية أحد الجزيئات الناقلة للألم على الخلايا مستقبلات الألم على نحو فعال وانتقائي، فهل سيضمن هذا التداخل الراحة التامة من الآلام المعقدة يا ترى؟ الجواب: ربما لا يفعل ذلك، لأن إغلاق مدخل واحد لطريق انتقال الشعور بالألم قد لا يكفي. تصور - مثلاً - أن هناك مركباً كيميائياً

لأنه في بعض الحالات الخاصة تُنشّط البروتونات مجموعة مستقلة من الكواشف detectors الموجودة على الخلايا مستقبلات الألم، تدعى القنوات الأيونية المتحسّسة بالحامض acid-sensing ion channels (ASICs).

### لنركز على النخاع الشوكي

قد يكون أحد حلول هذه المشكلة التي تبدو من دون نهاية، أن يُعطى مزيج من الجزيئات المثبطة التي تستهدف عدة آليات لاستشعار الألم فوراً. إلا أن طريقاً آخر هو أن تستهدف جزيئات تعمل مركزياً، لحجب إمكانية جميع الخلايا مستقبلات الألم على نقل إشارات الألم إلى خلايا النخاع الشوكي العصبية - مهما كانت أنواع المنبهات التي أثارت هذه الخلايا في الأصل.

هذه الطريقة هي التي تعمل عند استخدام المورفين والأفيونات الأخرى، التي تترايط بالمستقبلات الأفيونية على نهايات الخلايا مستقبلات الألم المتصلة بالنخاع الشوكي؛ فبتفعيل المستقبلات الأفيونية هذه تمنع الأفيونات تحرّر النواقل العصبية، مما

خيارات تلك العقاقير لدى الطبيب إذا أراد سلامة المريض. كما أن كثيراً من الأطباء لا يرغبون في وصف الأفيونات خوفاً من الإدمان، علماً أن الوقوع في الإدمان غير شائع عند من يتعاطون الأفيونات بهدف التخلص من الألم فقط. وللتخلص من بعض الآثار الجانبية كثيراً ما يلجأ الأطباء إلى حقن الأفيونات مباشرة في السائل المحيط بالنخاع الشوكي (داخل القراب). كما أن هذه العقاقير يمكن أن تحقن في العضل (للتخلص من الأوجاع التالية للعمليات الجراحية)، أو تدفع تدريجياً عن طريق مضخة وريدية (للتخلص من الآلام المزمنة).

ثم إن هناك بدائل للأفيونات. فالأدوية التي تعترض عمل قنوات الكالسيوم يمكن أن تمنع تحرر النواقل العصبية من نهايات الخلايا مستقبلات الألم في النخاع الشوكي مثلاً على ذلك هما دواء غابابنتين Gabapentin (نيوروتين Neurotin) المضاد للاختلاج، الذي يُعتقد أنه يريح من أشكال من الألم يتفاعل مع وحدات فرعية لبعض

Focus on the Cord (٤)

(١) أو الساعة RNA messengers



لكي تصل إشارات الألم من الخلايا مستقبلات الألم إلى الدماغ عن طريق الخلايا العصبية في النخاع الشوكي، لابد لمستقبلات الألم أن تحرر إشارات كيميائية مثل الكلوتامات glutamate والمادة P داخل القرن الظهري في النخاع الشوكي. ولابد لهذه المواد الكيميائية من بعدها أن تكشف بواسطة مستقبلات خاصة على الخلايا العصبية في القرن الظهري. كذلك لابد لقنوات الكالسيوم أن تفتح كي تحرر الخلايا مستقبلات الألم جزيئاتها المستخدمة للإشارة. ويحصل تأثير المورفين والأفيونات الأخرى المشابهة (وهي من أقوى مضادات الألم حالياً) - على الأقل جزئياً - من تفعيل المستقبلات الأفيونية التي تحجب قنوات الكالسيوم. لكن الأفيونات لديها آثار جانبية غير مقبولة، لذلك يسعى الباحثون إلى إيجاد مركبات كيميائية جديدة تؤثر في أهداف أخرى في النخاع الشوكي.



مستقبلات الألم - وبخاصة الحمض الأميني كلوتامات glutamate amino acid الذي يعد الوسيلة الأساسية لنقل إشارة الألم. وينشط الكلوتامات مستقبلات مختلفة في القرن الظهري للنخاع الشوكي، وتشترك الزمرة NMDA (الزمرة النمدائية) من هذه المستقبلات في تحسس الألم المركزي، وهذا يجعلها هدفاً معقولاً للعقاقير الجديدة المضادة للألم.

ولما كانت كل خلية عصبية في الجسم تحوي نوعاً أو أكثر من المستقبلات NMDA، فإن تثبيط جميع هذه الأنواع مرة واحدة لابد أن يؤدي إلى آثار جانبية كارثية، مثل فقدان الذاكرة والاختلاجات المعممة والشلل. ولتلافي مثل ردود الفعل

السرطان الذين لا يستفيدون من أية وسيلة علاجية أخرى [انظر: «زيفان مسكن للألم»، **العلوم**، العددان 4/3 (2006)، ص 72].

وتطبق تجارب سريرية مؤخرًا على عقاقير تعمل على مستقبلات المواد الشبيهة بالحبشيش والتي تنقل آثار المراهونة "marijuana" - والظاهر أن هذه المواد تخفف الألم بعدة طرق، منها اعتراض نقل الإشارات بين خلايا مستقبلات الألم والخلايا المستهدفة في النخاع الشوكي، ومنها إضعاف فعالية الخلايا الانتهائية.

### لنغلق الفجوات

يركز بعض الباحثين على منع خلايا النخاع الشوكي العصبية من الاستجابة للنواقل العصبية التي تحررها الخلايا

قنوات الكالسيوم؛ ودواء جديد نوعاً ما يدعى زيكونوتايد Ziconotide (پريالت Prialt) مستخرج من سم حلزون يعيش في المحيط الهادئ، يثبط نوعاً مختلفاً من قنوات الكالسيوم يدعى النوع N-type N.

وكما هي الحال في مستقبلات الأفيونات، توجد قنوات الكالسيوم من النوع N في جميع أنحاء الجهاز العصبي. فإذا أعطي زيكونوتايد جهازياً أدى ذلك إلى هبوط الضغط الشرياني هبوطاً سريعاً؛ لذلك يعطى هذا الدواء داخل القرباب (في السائل المحيط بالنخاع الشوكي). ولكن مع أن هذا السم الحيواني يحجب الألم، فمفعوله داخل الجهاز العصبي المركزي يحدث آثاراً جانبية غير مستحبة، كال دوخة والغثيان وآلام الرأس والتشوش الذهني، لذلك يعطى الزيكونوتايد خاصة للمصابين بمراحل متقدمة من

Drug Targets In The Spinal Cord (••)  
Batten Down the Hatches (•••)  
(١) أو المرجونة



## تطوير محاربين يتصدون للآلام<sup>(\*)</sup>

التجارب البشرية تطبق على مراحل متدرجة في التطور، ففي المرحلة I (الأولى) يكون التركيز على سلامة العلاج، وتشمل المرحلة II أولى التجارب التي تهدف إلى إثبات فعالية العلاج؛ أما المرحلة III فتختص بتجارب أوسع وأشمل.

ندرج في هذا الجدول بعض المركبات المضادة للآلام التي تعمل بآليات جديدة والتي تجرب حالياً على الإنسان، وقد حددنا منها لذلك الأصناف الجديدة من الزمر الصيدلانية المعروفة والمجربة كالأفيونات وحاصرات الإنزيمات COX. ومن المعروف أن

المركب (الشركة الصانعة)	طريقة العمل	مرحلة التجريب	الشركات التي تدرس مركبات مشابهة
(Amgen) AMG-517	يحجب مستقبل الكايسايسين	I	GlaxoSmithKline, Neurogen
(Evetec) EVT-101	يحجب المستقبلات NMDA التي تحمل الوحدة الجزئية NR2B	I	Roche, Merck & Co.
(Sanofi-Aventis) Icatibant	يحجب مستقبل البراديكاينين	II	Merck & Co.
(NeurogesX) NGX-4010	ينبه (تنبيه مفرطاً) مستقبل الكايسايسين	III	
(Neuromed Pharmaceuticals) NMD-160	يغلق قنوات الكالسيوم من النوع N	II	
(Newron Ph) Ralfinamide	يغلق قنوات الصوديوم	II	
(Rinat Neuroscience) RN624	يمنع عامل النمو العصبي من تنبيه مستقبلات الألم	II	Amgen
(Novartis) SAB-378	يفعل مستقبل المواد الشبيهة بالحشيش	II	GW Ph., GlaxoSmithKline

وقد يكون أحد الحلول الممكنة لهذه المشكلة - وهو حل يحظى اليوم باهتمام الباحثين نظراً إلى نجاحه في تجارب الحيوان - علاجاً بالطب النووي (الذري) يطيح بزمرة من خلايا النخاع الشوكي العصبية التي تستقبل الإشارات من خلايا مستقبلات الألم. هذا العلاج القاتل للخلايا يجمع أحد السموم (سپورين saporin) إلى المادة P. وفي المركب الناتج تتحد المادة P مع المستقبلات NK-1، وهذا يدخل المركب إلى بنية الجسم، ويسمح للسپورين بعدها أن يقتل الخلية العصبية. ولما كان المركب لا يدخل إلا الخلايا التي تحوي المستقبلات NK-1، فإن الباحثين يأملون أن تكون مضاعفاته الجانبية محدودة.

إلا أن التخلص من خلايا عصبية في النخاع الشوكي يجب أن يكون سهماً أخيراً فخلايا الجهاز العصبي المركزي لا تتكون من جديد بعد موتها، لذلك فالتبدلات التي تحدث بعد مثل هذه العلاجات - سواء كانت حميدة أو ضارة - هي تبدلات دائمة، ولا ينطبق نفس المبدأ على الجهاز العصبي المحيطي، لأن الألياف العصبية المتوترة يمكنها أن تولد نفسها من جديد

وقد يرجع السبب إلى أن حصار ذلك المستقبل غير كاف بحد ذاته. ولا يعرف فيما إذا كان تثبيط فعالية الببتيد CGPR في النخاع الشوكي سيفيد في التخلص من الألم. علماً بأن الصناعة الدوائية تطور حالياً عوامل مضادة لتخفيف ويلات الشقيقة migraine بواسطة اعتراض تحرير الببتيد CGRP في الأوعية الدموية الموجودة على سطح الدماغ.

### لنقض على حامل الرسالة<sup>(\*\*)</sup>

إذا فشلت جميع المساعي لتعديل إبلاغ إشارة الألم، فيمكن لنا أن نفكر في التخلص من الرسالة! إلا أن قطع أعصاب الخلايا مستقبلات الألم كثيراً ما يعود على المريض بالوبال، لأنه - كما رأينا - قد تولد الأذية العصبية ألاماً أكثر عناداً وديمومة من الألم الأصلي. ولقد كان قطع الطرق (الحبال) العصبية في النخاع الشوكي التي توصل إشارات الألم إلى الدماغ شأنها في وقت من الأوقات بالماضي، إلا أن هذا الإجراء اليوم غدا محصوراً في مرضى السرطان الذين يشكون من مراحل المرض الأخيرة عندما تنعدم الاستجابة لجميع أنواع المعالجات الألية، والمشكلة في الإجراء الأخير هي أن الجراح لا يستطيع إيقاف الشعور بالألم بشكل انتقائي

هذه، يحاول الباحثون اليوم تقييد هذه المستقبلات بالتأثير في أنواعها الموجودة في القرن الظهري للنخاع الشوكي لا غير. وفي هذا المجال، استطاع الباحثون أن يتوصلوا إلى نتائج مشجعة من تجارب أجروها على الحيوان مستخدمين مركبات كيميائية تتحد مع شكل من أشكال هذه المستقبلات يحتوي على ما يسمى الجزئي NR2B NR2B subunit. فتين - على سبيل المثال - أن الفئران التي حقن سائلها الشوكي مباشرة بالمثبط NR2B صارت أقل تحسناً للألم من تلك التي لم تحقن. كما أن هذا العقار استطاع أن يخفي التحسس من المؤثرات غير المؤلمة عادة في الفئران التي عُرِضت لأذية عصبية.

كذلك يحرر عدد من الخلايا مستقبلات الألم النواقل العصبية الببتيدية، مثل المادة P، والببتيد المتعلق بجينة الكالسيونين (CGPR). هذه الببتيدات تفعل الخلايا العصبية الناقلة للألم في النخاع الشوكي عن طريق تأثيرها في مستقبلات خاصة، لذا يتوقع للأدوية التي تحجب التفاعل مع هذه المستقبلات أن تكون فعالة في تخفيف الألم. ومع الأسف لم يفلح حصار المستقبلات التي تستخدمها المادة P - مستقبلات النيوروكاينين I أو NK-1 - في التجارب السريرية للسيطرة على الألم،

(\*) Pain Fighters in Development  
(\*\*) Kill the Messenger?



لها أسبابا عضوية حتى الآن، وقد بين الباحثون في جامعة ماغيل قبل نحو عشر سنوات مثلا أن التنويم المغنطيسي hypnosis باستطاعته تغيير فعالية الدماغ بحسب إدراك الشخص لحالة الألم. فبعد تنويم بعض المتطوعين، وغمس أيديهم بالماء الساخن، تمكن العلماء من الإيحاء لهم أن الماء الحار هو أكثر أو أقل إزعاجا مما كان عليه فعلا.

ووجد الباحثون باستخدام الومضان الطبقي البوزيتروني (PET) الذي يرقب فعالية الدماغ، أن قشرة الدماغ الحسية الحركية التي تتجاوب مع شدة التنبيه الفيزيائي، كانت فعالة بنفس الدرجة في كلتا الحالتين، في حين كانت منطقة أخرى من الدماغ (القشرة الحزامية) أكثر فعالية عندما اعتقد المتطوعون أن المنبه (الماء الحار) كان أكثر إزعاجا - وهذا يدل أن التنويم المغنطيسي غير طريقة إدراك المتطوعين لأحاسيس الألم: لذا يعتقد الباحثون أنهم إذا ازدادوا معرفة بالطريقة التي يعدل الدماغ بها تجربة الألم، فقد يستطيعون تطوير علاجات سلوكية جديدة لتخفيف إدراك الألم. وما علينا إلا أن نأمل أن يوصلنا البحث الحثيث في آليات الشعور بالألم إلى طرق معالجة آمنة وناجعة.

A Question of Perception (\*)

ولكن عقارا يعزز فعالية مستقبلات الكلايسين يمكن أيضا أن يهدم من نقل رسالات الألم إلى الدماغ.

### المسألة هي مسألة إدراك

لقد ناقشنا في هذه المقالة مجموعة من التوجهات التجريبية لمعالجة الألم التي أثبتت جدواها في الدراسات على الحيوان. ويمكن القول إن أكثر هذه التوجهات إثارة هي التي لا تلحق تغييرا في الإحساسات الطبيعية، في حين تخفف من التحسس المفرط الذي يرافق الآلام العصبية والالتهابية الصعبة المعالجة، والتي لا يرافقها آثار جانبية مهمة. لكن إذا تسألنا هل ستفيد هذه العلاجات مرضى الألم المعد فعلا وهل يمكن تطبيقها على جميع أنواع الألم، اضطررنا للاعتراف أن الجواب غير موجود حاليا.

ولعل واحدا من التوجهات التي لم تلق نصيبها الكافي من التجريب هو استخدام العلاجات السلوكية غير الدوائية في الآلام المزمنة - وبخاصة تلك التي ترافق حالات مرضية مثل الأوجاع الليفية العضلية fibromyalgia ومتلازمة المعى الهيجوية irritable bowel syndrome، والتي لم تثبت أن

لذلك يمكن للعلاجات التي تتلف الأجزاء الكاشفة للإشارات من فروع الخلايا مستقبلات الألم (كالجرعات العالية من كاپسايسين)، يمكنها مثاليا إيقاف الألم، مع السماح لهذه الفروع العصبية بالنمو من جديد في النهاية بحيث تعود لكتلة النسيج خصائصها الطبيعية في كشف الألم.

وقد لا يكون استهداف الخلايا العصبية الطريقة الوحيدة للتغلب على الألم، فقد أظهرت الدراسات أن الخلايا الداعمة في النخاع الشوكي (الدبقية glia) تنشط عندما تحدث أذية للأعصاب المحيطية، فتهاجر إلى ناحية القرن الظهري المرتبط بالأعصاب المصابة، وهناك تفرز هذه الخلايا مجموعة من المركبات الكيميائية التي تحث نهايات الخلايا مستقبلات الألم على تحرير النواقل العصبية في النخاع الشوكي، وهذا يبقي إشارة الألم قائمة، كذلك تجعل بعض هذه المركبات (مثل عوامل النمو، وجزئيات تدعى سايتوكاينات cytokines) خلايا القرن الظهري بحالة تهيج مستمر، ويعتقد أن العقاقير التي تحجب هذه الفعالية الزائدة لا بد أن تحد من حساسية الألم المفرطة. ويعمل عدد من المجموعات الطبية حاليا للكشف عن الجزئيات المسؤولة عن تنشيط الخلايا العصبية الداعمة هذه إبان تآذي الأعصاب وإيجاد طرق لكبحها

ومن المثير أن المواد التي تحررها الخلايا العصبية الداعمة وتسمى البروستاغلاندينات، تعزز الشعور بالألم باعتراض مستقبلات الحمض الأميني كلايسين glycine الموجود على خلايا القرن الظهري العصبية، وهو واحد من النواقل العصبية الناهية التي عادة ما تهدئ هذه الخلايا. لذلك فالأدوية NSAIDs قد تفيد ليس فقط بمعاكسة إنتاج البروستاغلاندينات في محيط الجسم (وهي الطريقة المعروفة)، ولكن أيضا باعتراض الإنزيمات COX في الخلايا العصبية الداعمة. وهذا يعني أن إيصال مثبطات الإنزيمات COX إلى السائل الشوكي مباشرة قد يخفف كثيرا من الآثار الجانبية التي يسببها إعطاء هذه الأدوية جهازيا،

### المؤلفان

Allan I. Basbaum - David Julius

كثيرا ما تعاوننا في دراسة الآليات الجزيئية والخلوية المؤدة للألام. حصل «باسباوم» على الدكتوراه في علم الأعصاب من جامعة بنسلفانيا، وهو حاليا رئيس قسم التشريح في جامعة كاليفورنيا بسان فرانسيسكو. أما «جوليس» فقد حصل على الدكتوراه في الكيمياء الحيوية من الجامعة U.C. في بيركلي، وهو حاليا أستاذ الفارماكولوجيا الجزيئية والخلوية في الجامعة U.C.S.F.، وهما مستشاران لشركات تبحث عن علاجات للألام.

### مراجع للاستزادة

The Perception of Pain. A. I. Basbaum and T. Jessel in *Principles of Neural Science*. Edited by Eric R. Kandel et al. McGraw-Hill, 2000.

Molecular Mechanisms of Nociception. David Julius and Allan I. Basbaum in *Nature*, Vol. 413, pages 203-210; September 13, 2001.

Immune and Glial Cell Factors as Pain Mediators and Modulators. S. B. McMahon, W. B. Cafferty and F. Marchand in *Experimental Neurology*, Vol. 192, No. 2, pages 444-462; 2005.

Pain Collection in *Nature Reviews Neuroscience*, July 2005. Available online at [www.nature.com/nrn/focus/pain](http://www.nature.com/nrn/focus/pain)

Emerging Strategies for the Treatment of Neuropathic Pain. Edited by James N. Campbell et al. IASP Press, 2006.

Scientific American, June 2006



## مخاطر ازدياد حموضة مياه المحيطات<sup>(\*)</sup>

«C.S. دوني»



استمر الرصد في مونا لوا من عام 1958 حتى الوقت الحاضر (باستثناء انقطاع واحد قصير). ولأن موقع هاواي ليس بعيدا كموقع القطب الجنوبي، فهو يُرى ارتفاعا وهبوطا حادّين في مستويات ثاني أكسيد الكربون متوافقة مع تغيّر الفصول في نصف الكرة الشمالي، إلا أنه في نهاية كل سنة يصبح تركيز هذا الغاز الحابس للحرارة أعلى ممّا كان عليه قبل 12 شهرا. وهكذا لم يمض زمن طويل على المجتمع العلمي ليدرك أنّ «ريفل» كان مصيبا - فمعظم ثاني أكسيد الكربون المنطلق إلى الغلاف الجوي مقدّر له أن يبقى هناك. كما أن حساباته كانت صحيحة عندما أوضح أنّ جزءا مهما من هذا الغاز ينتهي في البحر. لقد كان واضحا لدى «ريفل» منذ مدة طويلة أنّ الجزء الذي انتهى في البحر سيغيّر كيميائية مياه البحر تغييرا جوهريا. وبخلاف بعض مظاهر التغيّر المناخي، فإنّ حقيقة هذا التأثير - وهو بصورة أساسية ازدياد حموضة مياه المحيطات - لم تُناقش بصورة جدية، مع أنّ تأثيراتها الكاملة قد بدأ كشفها حاليا.

### كم هو غير طبيعي؟<sup>(\*\*)</sup>

سجّل نصف القرن الذي قدّمه «كيلنك» قيم للغاية، غير أنّ مدته كانت قصيرة جدا لوضع الحالة الراهنة في سياقها؛ ومع ذلك استطاع العلماء الحصول على عرض أطول مدّة وذلك بقياس

في عام 1956، أشار كل من «R. ريفل» و «H. سويس» [وهما جيوكيميائيان يعملان في معهد سكريبس لعلم المحيطات في كاليفورنيا] إلى الحاجة إلى قياس كمية غاز ثنائي أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) في الهواء والمحيطات للوصول إلى «فهم أوضح للتأثيرات المناخية المحتملة الناجمة عن الإنتاج الصناعي الكبير المتوقع لثاني أكسيد الكربون في الخمسين سنة القادمة». ويتعبّر آخر أراد أن يفهما كيف يمكن أن تكون عليه الوضعية المنذرة بالكارثة في الوقت الحاضر؛ ولذلك يبدو مدهشا أن يحتاجا الآن إلى البرهنة على أهمية مثل هذه الملاحظات، ولكن في ذلك الوقت لم يعرف العلماء بالتأكيد فيما إذا كان ثاني أكسيد الكربون المنطلق من عوادم الآلات ومداخن المعامل، يمكن أن يتراكم فعلا في الغلاف الجوي. وقد اعتقد البعض بقدرة مياه البحر على امتصاص جميع ثاني أكسيد الكربون أو أن تمتصه نباتات اليابسة.

فقد رأى «ريفل» مع الراحل «D.C. كيلنك» [الباحث الشاب الذي استخدمه في هذا المشروع] أنّه كان عليهما أن يضعوا المعدات في أماكن بعيدة عن المصادر المحلية لإطلاق ثاني أكسيد الكربون وامتصاصه، التي ربّما تُعطي قياسات متغيرة بصورة مضلّة. وكان أحد الأمكنة الذي اختاراه بعيدا كل البعد عن النشاطات الصناعية والغطاء النباتي الذي يمكن أن يصل إليه أي شخص؛ وهو القطب الجنوبي. أمّا المكان الآخر فكان في محطة الأرصاد الجوية المقامة على قمة مونا لوا في جزيرة هاواي.



يدخل الكثير من غاز ثنائي أكسيد الكربون المنبعث من احتراق الوقود الأحفوري في المحيطات، حيث يغيّر التوازن الحمضي لمياه البحر. وقد يكون تأثير هذا التغير في الحياة البحرية كبيرا جدا.



تتعرض الشعاب المرجانية - والتنوع البيولوجي (الحيوي) الرائع الذي تعبته - لهجوم قوي متعدد، يشمل التعرض لمواد كيميائية سامة وتغيير فيزيائي مباشر. وربما كان التهديد الأعظم والمعروف بدرجة أقل هو تغير كيمياء مياه المحيطات الذي يسببه احتراق الوقود الأحفوري. ففي الوقت الحاضر، يدخل إلى مياه المحيطات ثلث كمية ثنائي أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) المنطلق من عملية الحرق هذه خافضا بذلك الرقم الهيدروجيني pH لمياهها القلوية الطبيعية. وهذا الانحراف نحو ظروف أكثر حمضية يضعف قدرة المرجانيات (والكثير من الكائنات الحية البحرية الأخرى) على النمو.

في الغلاف الجوي: أما الباقي فتمتصه نباتات اليابسة أو مياه المحيطات، بنسب متساوية تقريبا. إن حقن كربون الوقود الأحفوري في مياه البحر لا يكون حاليا إلا إضافة صغيرة نسبيا إلى المحيط الذي هو مستودع ضخم لهذا العنصر الطبيعي؛ ولذلك يتطلب تحريّ الامتصاص وتحديد كميته قياسات دقيقة دقة واحد في الألف. ونظرا إلى أن كميات الكربون تتغير من مكان إلى آخر، فإن العمل يحتاج أيضا إلى الموارد والمثابرة لمسح تركيزات الكربون عبر العالم. لقد قام علماء المحيطات بهذا العمل تماما في أواخر الثمانينات والتسعينات من القرن الماضي، كجزء من تقييم عالمي قامت به مجموعتا بحث عرفتا باسميهما المختصرين JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) و WOCE (World Ocean Circulation Experiment).

ومع ذلك لم تتمكن تلك المسوح من التمييز في الكربون المقاس بين ما هو طبيعي وما هو مشتق من ثنائي أكسيد الكربون الذي طرحه الناس في الهواء. ولإنجاز هذا العمل قام في عام 1996

الفقاعات الهوائية المحبوسة في لباب الجليد. فقد توصلوا من هذا الأرشفة الطبيعي إلى أن تركيز ثنائي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي كان ثابتا تقريبا لعدة آلاف من السنين وبعدها بدأ بالزيادة بسرعة مع بداية عصر التصنيع في القرن التاسع عشر. إن نسبة هذا الغاز في الوقت الحاضر أعلى بنحو 30% عما كانت عليه قبل عدة مئات من السنين، ومن المتوقع أن تصبح ضعفي أو ثلاثة أضعاف مستواها السابق في نهاية هذا القرن.

يأتي المدد المتنامي من الكربون في جزئه الأكبر من احتراق الوقود الأحفوري: الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي (تصفيف صناعة الأسمنت واحتراق الغابات المدارية بعضها منه أيضا، وللتبسيط دعنا نصرف النظر عن هذا الرقم الثانوي من أجل الوضوح). وبخلاف مكونات الكائنات الحية، لا يحوي الوقود الأحفوري - أو يحوي القليل من - الشكل المشع من الكربون: أي نظير الكربون 14 الذي يتألف من ثمانية نيوترونات في نواته عوضا عن ستة نيوترونات في الكربون العادي. كما أن في الوقود الأحفوري نسبة فريدة من نظيري الكربون المستقرين (الكربون 12 والكربون 13)؛ ومن ثم فإن احتراق الوقود الأحفوري سيترك بصمة نظيرية متميزة في الغلاف الجوي. وهكذا لا يمكن لأحد أن يتساءل من أين تأتي الزيادة المتنامية من ثنائي أكسيد الكربون.

يمكن أن تتغير معدلات الامتصاص. وفي وقتنا الحاضر فإن نحو 40% من ثنائي أكسيد الكربون المنبعث من الوقود الأحفوري يبقى



كانت عليه في الماضي القريب، وهو متوافق مع فكرة أن البحر يمتص ثنائي أكسيد الكربون الجوي، وقد وجد علماء بحار آخرون اتجاهات مشابهة في المحيطين الهادئ والهندي. فما هو بالضبط ما يندرج به هذا التغير في البيئة البحرية؟

### مراجعة لأوليات كيمياء المحيطات<sup>(\*)</sup>

مع الأسف، يتطلب تفسير هذه التغيرات في مياه المحيطات، مراجعة لبعض دروس كيمياء السنة الأولى الجامعية؛ ولكن الأمر ليس شاقاً. يتحدثنائي أكسيد الكربون ( $\text{CO}_2$ ) مع الماء ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ليشكل حمض الكربون الضعيف ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ )، وهو الحمض نفسه الموجود في المشروبات الغازية الكربونية. وهو مثل جميع الحموض يطلق أيونات الهيدروجين ( $\text{H}^+$ ) في المحلول، ويحرر أيضاً أيونات البيكربونات ( $\text{HCO}_3^-$ ) مع كمية أقل من أيونات الكربونات ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). ويبقى جزء صغير من حمض الكربون في المحلول من دون أن يتفكك مع كمية صغيرة أيضاً من ثنائي أكسيد الكربون، والخليط الناتج المؤلف من مركبات الكربون والأيونات هو إلى حد ما خليط معقد.

والنتيجة البسيطة الوحيدة لكل هذا الذوبان والتفكك هي زيادة في تركيز أيون الهيدروجين، حيث يقدر الكيميائيون عادة كميتها بمقياس الرقم الهيدروجيني (pH) المعروف. إن انخفاض وحدة واحدة على هذا المقياس يتوافق مع زيادة مقدارها عشرة أضعاف في تركيز أيونات الهيدروجين، وهذا يجعل الماء أكثر حمضية، في حين أن ارتفاعه وحدة واحدة نحو الأعلى يتوافق مع نقصان 10 أضعاف، وهذا يجعل الماء أكثر قلوية. والرقم الهيدروجيني المتعادل (للماء النقي) هو 7. ويراوح الرقم الهيدروجيني لماء البحر الأصلي ما بين 8 و 8.3، وهذا يعني أن مياه المحيطات إلى حد ما هي مياه قلوية بصورة طبيعية.

لقد تسبب امتصاص ثنائي أكسيد الكربون في خفض الرقم الهيدروجيني في المياه السطحية الحديثة قرابة 0.1 (أقل قلوية) مما كان عليه في الأزمنة ما قبل الصناعية. وما لم تُعدّل الحضارة «شبهتها» للوقود الأحفوري في القريب العاجل وبطريقة فعالة فإن الرقم الهيدروجيني لمياه المحيط سوف يهبط 0.3 إضافية عند حلول عام 2100. وفي تنبؤ مقلق لمستقبل أكثر بعداً يشير «K» كالدبراء [المتخصص في علم المحيطات بمعهد كارنيغي في واشنطن] إلى أن الرقم الهيدروجيني للمحيطات سيصبح بعد قرون من الآن أخفض من أي وقت مضى خلال 300 مليون سنة الماضية.

وقد تبدو هذه التغيرات في الرقم الهيدروجيني صغيرة ولكنها تنذر بالخطر: إذ تشير التجارب الحديثة بوضوح إلى أن هذا التغير يؤدي بعض أشكال الحياة البحرية وبصورة خاصة الكائنات التي تعتمد على وجود أيونات الكربونات لبناء أصدافها (أو الأجزاء الصلبة الأخرى) من كربونات الكالسيوم ( $\text{CaCO}_3$ ).

في البداية، يبدو هذا «القلق» متناقضاً. فعلى الرغم من جميع الاعتبارات، وإذا كان بعض ثنائي أكسيد الكربون الذي امتصته مياه البحر يتفكك إلى أيونات كربونات، فيُتوقع أن يوجد الكثير منها في هذه المياه، أكثر مما كان متاحاً في غير هذه الظروف. ومع ذلك، يتصدع هذا المنطق لأنه يهمل تأثير جميع أيونات الهيدروجين التي تكون قد تشكلت والتي تنزع إلى الاتحاد مع أيونات الكربونات مشكلة أيونات بيكربونات

> كروبر» [الذي يعمل حالياً في جامعة كاليفورنيا، لوس أنجلوس] مع اثنين من زملائه، بتطوير تقنية جديدة. إن تطبيق طريقة «كروبر» على معلومات المجموعتين JGOFS و WOCE، هذا التمرين الذي انتهى في عام 2004، يوحي بأن المحيطات امتصت تماماً نصف الكربون الأحفوري المنطلق إلى الغلاف الجوي منذ بداية الثورة الصناعية.

والطريقة الأخرى لتوثيق هذه العملية هي إجراء قياسات متكررة للكربون في الجزء نفسه من المحيط. ويجب الحذر في تمييز الكربون الأحفوري من المصادر البيولوجية المختلفة لعنصر الكربون في مياه البحر. وتحتاج الملاحظات إلى عقد من الزمن أو أكثر للكشف عن الاتجاه الكلي الناتج من حرق الوقود الأحفوري مقابل خلفية التغيرات الطبيعية. لقد قُسمت في العام الماضي (2005) مع

### منذ بداية الثورة الصناعية، امتصت المحيطات بصورة كاملة نصف كمية الكربون الأحفوري المنطلقة في الغلاف الجوي.

> فانينكوف» [من مختبر National Oceanic and Atmospheric Administration's Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory] بقيادة بعثة بحث لإجراء تجربة مثل هذه تماماً.

لقد أمضينا شهرين تقريباً مع فريق مكون من 31 عالماً وفنياً وطالباً على متن مركب لأخذ العينات من أجل دراسة الخواص الكيميائية والفيزيائية لجنوب غرب المحيط الأطلسي، بدءاً من سطحه إلى قاعه ومن القطب الجنوبي إلى خط الاستواء، وهي الشريحة نفسها من المحيط التي قُمت بقياسها مع علماء آخرين في عام 1989 عندما كنت طالب دراسات عليا.

وعندما قارنا ملاحظتنا التي أجريناها في عام 2005 بتلك التي أجريت قبل 16 سنة، وجدنا أن تركيز الكربون في مئات الأمطار القليلة العليا من المحيط الأطلسي في الوقت الحاضر أعلى مما

### نظرة إجمالية/ثنائي أكسيد الكربون في المحيطات

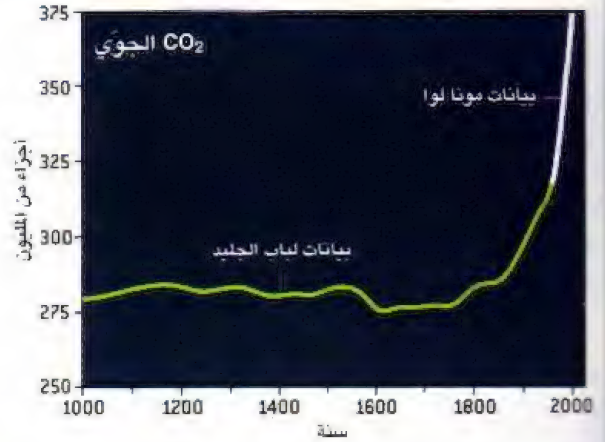
- في الوقت الحاضر، ينتهي في المحيطات نحو ثلث كمية ثنائي أكسيد الكربون ( $\text{CO}_2$ ) المنطلق من احتراق الوقود الأحفوري.
- يتكون حمض الكربون من ثنائي أكسيد الكربون المحتص في مياه البحر مخففاً بذلك مستوى الرقم الهيدروجيني pH السائد (الذي هو قليل القلوية) ومغيراً توازن أيونات الكربونات والبيكربونات.
- إن الانزياح نحو الحموضة والتغيرات في كيميائية مياه المحيطات التي تنشأ، تجعل بناء المخلوقات البحرية لأجزائها الصلبة من كربونات الكالسيوم أكثر صعوبة. وهكذا فإن انخفاض الرقم الهيدروجيني يهدد مجموعة من الكائنات الحية البحرية تتضمن المرجانيات التي هي أحد مواطن الكائنات الأغنى على الكرة الأرضية.
- وخلال قرن من الزمن سيصبح سطح المحيط الجنوبي مؤدياً لأصداف القواقع (الحلزونات) الصغيرة التي تشكل حلقة مهمة من حلقات سلسلة الغذاء البحري ضمن هذه المنطقة المرتفعة الإنتاج.



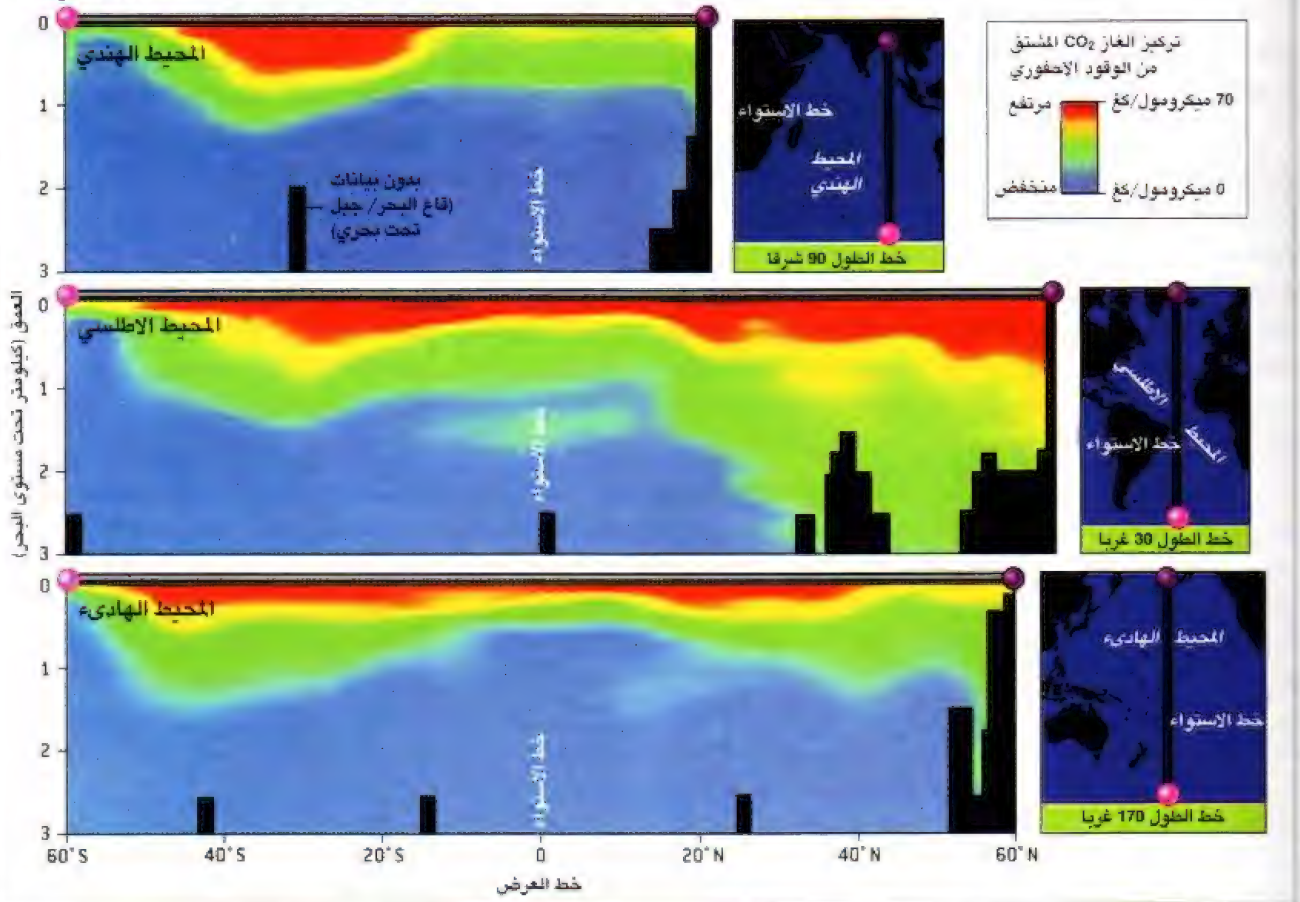
## ثنائي أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>): من الغلاف الجوي إلى المحيط

ارتفع تركيز ثنائي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ارتفاعاً كبيراً في القرن الماضي أو نحو ذلك. وقد تم توثيق هذا الارتفاع توثيقاً جيداً (في اليمين) بضم تقنيتين اثنتين: أولاً فحص فقاعات الهواء المنحسبة في جليد الجليديات (الثلاجات) [الجزء الأخضر من الخط البياني الذي يبين معدل (متوسط) 75 سنة]، والتقنية الأخرى هي القياسات المباشرة للغلاف الجوي [الجزء الأبيض من الخط البياني الذي يعكس المعدل السنوي المقاس في محطة الأرصاد الجوية المقامة في أعلى جبل مونا لوا على الجزيرة الكبيرة من هاواي].

إن هذا التركيز المتزايد لثنائي أكسيد الكربون، بهذا القدر، يمكن أن يكون أكبر بكثير فيما لو لم تمتص مياه البحر الكثير منه - وهي ظاهرة وثقتها المسوح التي أجريت في المحيطات، وتبين المقاطع السفلى أمكنة وجود نحو نصف تدفق الوقود الأحفوري في الوقت الحاضر - في الأجزاء العليا من محيطات العالم



### CO<sub>2</sub> المحيطات



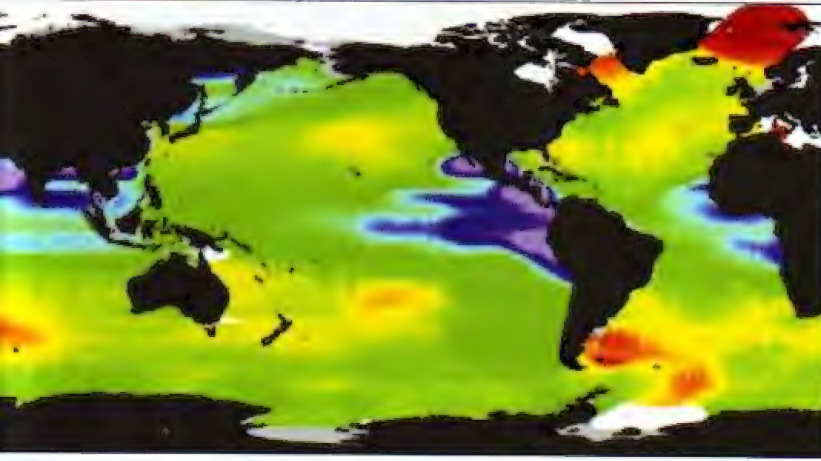
وتوجد بشكل عام قريبة من سطح المحيطات (حيث تستخدم ضوء الشمس الوفير في عملية التركيب الضوئي). أما الأمثلة الأخرى المهمة فهي الكائنات الطافية التي تدعى المنخربات foraminifera (التي تنتمي إلى مجموعة المتحورات amoeba) والبيروبودات pteropods (قواقع بحرية صغيرة). وهذه المخلوقات الصغيرة تكون مصدراً غذائياً رئيسياً للأسماك والثدييات البحرية التي تتضمن بعض أنواع الحيتان

CO<sub>2</sub>: From Atmosphere To Ocean (+)

والنتيجة النهائية هي إذا نقصان في تركيز أيونات الكربونات. ويمكن القلق من أن خفض الرقم الهيدروجيني (وكذلك تركيز أيونات الكربونات التي من المتوقع أن تنخفض إلى النصف في أثناء هذا القرن) سوف يعرقل قابلية بعض الكائنات الحية على تصنيع كربونات الكالسيوم إلى حد سيجعل نمو تلك الكائنات الحية صعباً. إن أكثر أشكال الحياة تأثراً بذلك هو نوع من العوالق النباتية phytoplankton (كائنات نباتية طافية) تدعى حاملات الكوكوليتات coccolithophorids المغطاة بلويحات صغيرة من كربونات الكالسيوم



## الحموضة المتغيرة في مياه المحيطات<sup>(\*)</sup>



تكشف القياسات التي أجريت على الخمسين مترا العليا من مياه المحيطات، أن الرقم الهيدروجيني يتغير تغيراً كبيراً من مكان لآخر ويتوقع العلماء تناقص الرقم الهيدروجيني في مياه المحيطات في السنوات القادمة

تنشأ المناطق المائية ذات الرقم الهيدروجيني المنخفض نسبياً (يعني ذلك زيادة في الظروف الحمضية) على الأغلب من خلال صعود المياه العميقة طبيعياً. قد تكون هذه المناطق، مثل تلك التي تقع في الجزء الاستوائي الشرقي من المحيط الهادئ، أمثلة جيدة للعلماء لدراسة التأثيرات المتوقعة سيادتها على مساحات أوسع في المستقبل

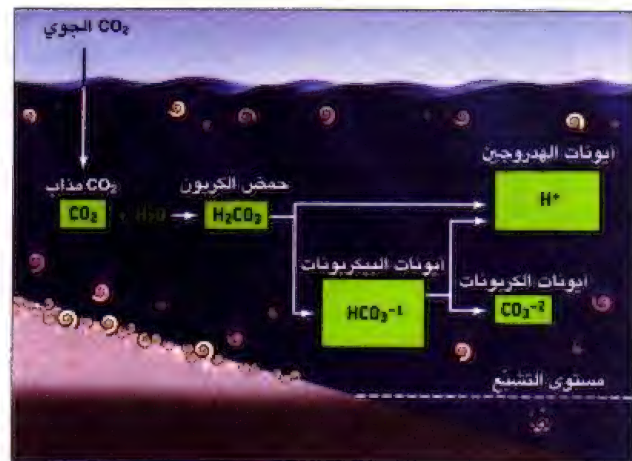
وتوجد أمثلة أقل وضوحاً في أمكنة أعمق من البحار، حيث تغطي جزئياً تجمعات من مرجانيات الماء البارد الحواف القارية والجبال البحرية seamounts مشكلة مواطن مهمة للأسماك. تدين مرجانيات المياه الضحلة بألوانها الجميلة جزئياً إلى الطحالب المتكافلة معها التي تعيش داخل خلايا المرجان. تترك أحياناً هذه الطحالب عائتها (مضيفها) استجابة لأشكال متنوعة من الإجهاد البيئي كاشفة بذلك الهيكل الأبيض الذي تحتها المؤلف من كربونات الكالسيوم. ويمكن أن تحدث عملية «التبييض» bleaching هذه، نتيجة لارتفاع درجات الحرارة ارتفاعاً كبيراً مثلاً. ويظن بعض العلماء أن ازدياد حموضة مياه المحيطات (أو بتعبير أصح نقصان في الحالة القلوية الضعيفة في مياه المحيطات) ينزع أيضاً إلى الحضر على مثل هذه الأحداث العرضية.

### البقاء للأثخن<sup>(\*\*)</sup>

ومع ذلك يمكن أن تتأثر المرجانيات والكائنات البحرية المكسنة، بازدياد الحموضة بطرق أكثر أهمية - أي يمكن لأصدافها في الواقع أن تتفتت. وإذا أردت توضيح هذا القلق: دع قطعة من الطباشير (كربونات الكالسيوم) تسقط في كأس تحوي حمض الخل (وهو حمض ضعيف)، ستبدأ قطعة الطباشير بالذوبان فوراً وللوصول إلى فهم أكمل لشكل الحياة الأكثر عرضة للخطر، مثل خطر الموت، لا بد من درس آخر في الكيمياء.

توجد كربونات الكالسيوم في المرجانيات أو في أصداف المخلوقات البحرية الأخرى في شكلين معدنيين اثنين: الكالسيت والاراكونيت. كما أن بعض الكائنات الحية التي تفرز الكالسيت تصيف عنصر المغنيزيوم إلى المزيغ. ويكون كل من الاراكونيت والكالسيت المغنيزي أكثر ذوباناً من الكالسيت العادي. وهكذا فإن المرجانيات و البتروبيدات التي تبني أصدافها من الاراكونيت والطحالب المرجانية المكونة أصدافها من الكالسيت المغنيزي، قد تكون معرضة بصورة خاصة للأذى نتيجة ازدياد حموضة مياه المحيطات. تعتمد قابلية ذوبان كربونات الكالسيوم بصورة أساسية على

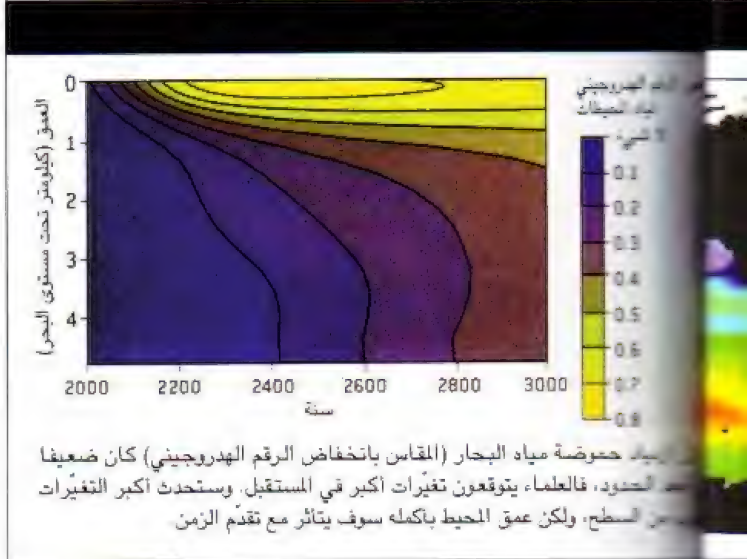
ويخشى البيولوجيون أيضاً مما قد يحدث للمرجانيات، التي على الرغم من مظهرها الذي يشبه النباتات، فإنها في الواقع مستعمرات من حيوانات صغيرة تنتمي إلى شقائق البحر sea anemones، فهي تتغذى بترشيح العوالق البحرية (كائنات صغيرة طافية) من مياه البحر وتفرز هياكل من كربونات الكالسيوم التي تتراكم مع الزمن لتشكل ما يسمى الشعاب المرجانية coral reefs التي تشكل النظم البيئية ecosystems الأكثر إنتاجاً وتنوعاً من الناحية البيولوجية. وإضافة إلى ذلك تسهم الطحالب المرجانية coralline algae (طحالب تفرز أيضاً كربونات الكالسيوم، وغالباً ما تشابه المرجانيات في المظهر) في «كلسنة» calcification الكثير من الشعاب المرجانية. فالرصيف (الشعب) الحاجزي الكبير Great Barrier Reef المقابل لشاطئ أستراليا مثلاً - وهو البنية البيولوجية الأكبر في العالم - هو بكل بساطة تراكم من المرجانيات والطحالب المرجانية، جيلاً بعد جيل.



يتحد ثنائي أكسيد الكربون الممتص من الهواء مع الماء لتشكيل حمض الكربون. يبقى جزء من هذا المركب في مياه المحيطات ولكن معظمه يتفكك إلى أيونات الهيدروجين المحض وأيونات البيكربونات. كما أن بعض أيونات البيكربونات تتفكك مشكلة أيونات كربونات وأيونات هيدروجين إضافية. وتسبب هذه التغيرات الكيميائية انزياح مستويات التشبع saturation horizons نحو الأعلى (نحو سطح البحر) فيما يتعلق بمعدني الكالسيت والاراكونيت - حيث تذوب أصداف الكائنات الحية المكونة من هذين المعدنين في المياه العميقة تحت هذه المستويات.



وبعد مدة قصيرة برهن <U>. ريبسل< من معهد ألفرد وكتر للأبحاث البحرية والقطبية> وزملاؤه على وجود إعاقه مشابهة في نمو حاملات الكوكوليتات الطافية. وتتوافر حاليا تجارب مختبرية للكشف عن التأثيرات المؤدية لزيادة ثنائي أكسيد الكربون (والرقم الهيدروجيني الأخفض الذي ينتج منها) على كل المجموعات الرئيسية من الكائنات الحية البحرية التي تتمتع بأجزاء صلبة مؤلفة من كربونات الكالسيوم. ونظرا إلى كون درجة فوق إشباع المياه الباردة هي أقل بصورة طبيعية من المياه الدافئة لجميع أشكال كربونات الكالسيوم، فإن نظم البيئات المائية العميقة الواقعة في مناطق خطوط العرض العليا قد تكون الأولى التي تعاني ازدياد حموضة مياه المحيطات. والأمر الأكثر احتمالا أن المياه السطحية القطبية ستصبح «تحت مشبعة» بالنسبة إلى الأراكونيت قبل نهاية هذا القرن. واعتمادا على أعمال <V.J>. فابري< [من جامعة ولاية كاليفورنيا، سان ماركوس]، فإن



## وهكذا كلما ازدادت حموضة مياه المحيطات أكثر فأكثر صارت الأجزاء العلوية منها، الصديقة للقواقع<sup>(١)</sup>، أقل سمكا.

إحدى الإمكانات المقلقة تكمن في أن البترويدات القطبية سوف تختفي جميعها تماما، أو ربما سوف تجبر على الهجرة إلى مناطق خطوط العرض الأدنى والأدنى على افتراض إمكانية تكيفها مع تلك البيئات. ولا يعلم أحد كيف سيؤثر النقصان الكبير في عدد البترويدات في الأجزاء الأخرى من النظام البيئي البحري. ولكن حقيقة أن تلك القواقع الصغيرة تشكل حلقة في السلسلة الغذائية للمحيط الجنوبي (فهي تعيل جماعات كبيرة من الأسماك والحيتان والطيور البحرية) هي سبب وجيه لهذا القلق.

وقد ينتظر العوالق البحرية الكلسية النباتية والحيوانية في خطوط العرض العليا مصير مشابه، مع أن تضائل أعدادها سيتم بعد عقود من الزمن بسبب أن أصداها مكونة من الكالسيوم شكل كربونات الكالسيوم الأقل ذوبانا. ومن المحتمل أيضا أن تتأثر مجتمعات مرجان المياه العميقة وبصورة خاصة تلك التي تعيش في غرب الأطلسي الشمالي على طول ممر المياه المحتوية على تراكيز مرتفعة من الكربون الناجمة عن انبعاثات الوقود الأحفوري.

أما مستقبل الشعاب المرجانية المتوقع فمن المؤكد أنه أكثر قتامة. وفي هذه النظم البيئية «الثمينة»، فإن ازدياد حموضة مياه المحيطات ليس إلا واحدا من إجهادات بيئية كثيرة، وهو هجوم يتضمن: احترارا دقيقا وتلوثا محليا وصيدا جائرا وتدميرا للمواطن. والكثير من الشعاب المرجانية حاليا في تراجع ويمكن أن يدفع ازدياد حموضة مياه المحيطات بعضها إلى الموت، ومن ثم إلى انقراضها.

## تغير بحري قادم<sup>(٢)</sup>

وبمقدار ما يتوقع من حدوث ظروف سيئة للكثير من الكائنات الحية البحرية، فإنه سيكون هناك بعض المنتصرين أيضا. ففي

تركيز أيونات الكربونات (ومن ثم تعتمد بصورة غير مباشرة على الرقم الهيدروجيني)، ولكن قابلية الذوبان تتوقف أيضا على متغيرات متعددة أخرى تتضمن درجة الحرارة والضغط. إن الكثير من المياه الباردة العميقة الحالية مياه حمضية تكفي لإذابة أصداف كربونات الكالسيوم. ويقال لهذه المياه إنها مياه «تحت مشبعة» undersaturated. وتوصف المياه السطحية الدافئة الضحلة بأنها «فوق مشبعة» supersaturated فيما يتعلق بالكالسيوم والأراكونيت على السواء، وهذا يعني عدم قابليتهما للذوبان. إن الانتقال بين الظروف تحت المشبعة والظروف فوق المشبعة يرجع إلى مستوى الإشباع؛ أي إلى المستوى الذي تبدأ تحته الأصداف والهياكل المؤلفة من كربونات الكالسيوم بالذوبان.

إن تدفق ثنائي أكسيد الكربون من الغلاف الجوي إلى المحيط تسبب في إزاحة مستوى التشبع للأراكونيت والكالسيوم مسافة 50 إلى 200م إلى الأعلى نحو سطح المحيطات مقارنة بما كان عليه في القرن التاسع عشر. وتشير الدراسات الحديثة إلى أن مستوى التشبع سيرتفع أكثر في العقود القادمة. ومن ثم، كلما ازدادت حموضة مياه المحيطات أكثر فأكثر، صارت الأجزاء العلوية منها، الصديقة للقواقع<sup>(١)</sup>، أقل سمكا. وبمعنى آخر ستصبح مياه المحيطات بالتدريج أقل ملائمة للكائنات الحية المفترسة لكربونات الكالسيوم.

ومنذ البداية، استنتج الكثير من العلماء أن ازدياد حموضة مياه المحيطات يمكن أن يثير فقط مشكلة ثانوية لأن المياه السطحية ستبقى «فوق مشبعة» - على الأقل فيما يتعلق بالكالسيوم الذي هو الشكل الأكثر استقرارا من كربونات الكالسيوم. ففي أواخر التسعينات من القرن الماضي، قاد <C>. لانغدون< المتخصص في البيولوجيا البحرية بجامعة ميامي< تجربة متميزة لاختبار هذا الافتراض: إذ غير كيمياء المياه على رصيف مرجاني صناعي أقيم في خزان ضخم في مختبر البيوسفير II بجامعة كولومبيا (الذي يقع، بصورة مستغربة، في وسط صحراء أريزونا). وبصورة مدهشة وجد أن معدل إنتاج كربونات الكالسيوم في المرجانيات قد انخفض مع انخفاض الرقم الهيدروجيني، مع أن المياه بقيت فوق مشبعة إلى حد بعيد فيما يتعلق بالأراكونيت.

shell friendly (١)

Coming Sea Change (٢)





أحد أنواع المخربات (كلوبجربا بولونيد)

أحد أنواع حاملات الكوكوليكات (إيليانا مكسلي)

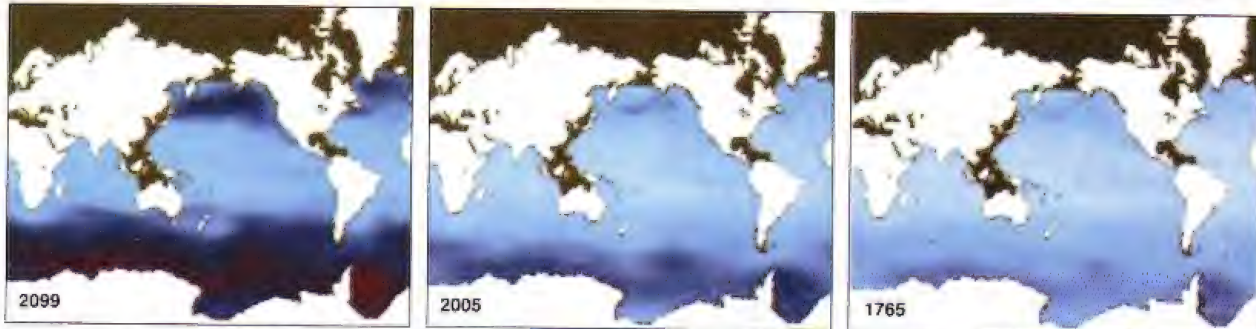
أحد أنواع البتروبودات (نيكاسينا هيليسينا)

الشيء الكثير عن هذا المفعول التسميدي fertilization لوضع تنبؤات ثابتة لمستقبل العوالق النباتية أو للقول فيما إذا كانت المستويات الأعلى لثنائي أكسيد الكربون ستفيد الطحالب التي تقوم بعملية التركيب الضوئي والتي تعيش داخل المرجانيات. إن الكثير من أنواع العوالق النباتية البحرية يستخدم أيون البيكربونات في عملية التركيب الضوئي. ونظرا إلى أن تركيز هذا الأيون لن يتغير

الوقت الحاضر، توجد كمية قليلة من الكربون في مياه البحر على شكل ثنائي أكسيد كربون ذائب، وهذه الندرة تحد من نمو بعض أنماط العوالق النباتية (كائنات نباتية طافية) ويكرس الكثير من هذه الأنواع جزءا مهما من طاقته لتركيز ثنائي أكسيد الكربون داخل خلاياه. ومن المفترض أن الزيادات في ثنائي أكسيد الكربون المذاب ستكون مفيدة لها، وربما هذا هو الذي سيحصل. ومع ذلك لم يُعرف

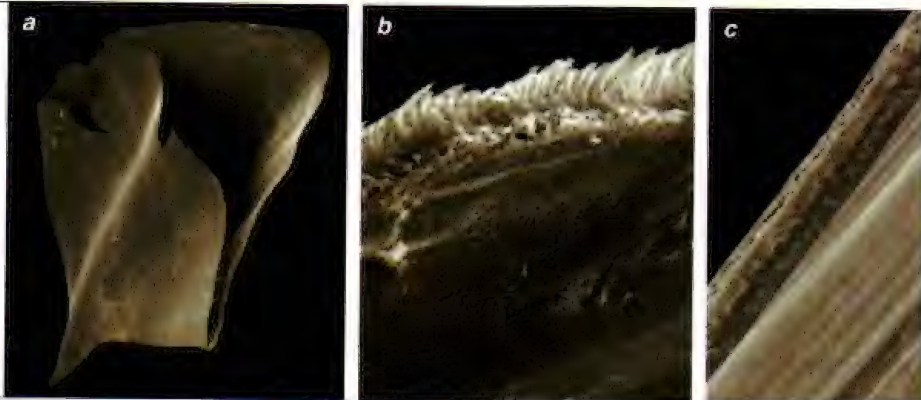
### المستقبل «المُخرق» للأراكونيت<sup>(١٠)</sup>

إن نقصان مستويات الرقم الهيدروجيني سيضعف قدرة بعض الكائنات البحرية على بناء أجزائها الصلبة وسوف يؤثر هذا النقصان عاجلا وبشدة في المخلوقات التي تبني أجزائها الصلبة من الأراكونيت - وهو شكل كربونات الكالسيوم الأكثر قابلية للذوبان. وستتغير درجة التهديد بحسب المناطق



قبل الثورة الصناعية (في اليمين) كانت المياه السطحية بمعظمها فوق مشبعة إلى حد كبير فيما يتعلق بالأراكونيت (اللون الأزرق الفاتح) متيحة للكائنات الحية البحرية تكوين هذا المعدن بسهولة. غير أنه في الوقت الحاضر (في الوسط) تكون درجة فوق إشباع المياه القطبية منخفضة جدا (اللون الأزرق الغاتم). أما في نهاية هذا القرن (في اليسار) فإنه من المتوقع أن تصبح أمثال هذه المياه الماردة، وبصورة خاصة تلك التي تحيط بقارة القطب الجنوبي، تحت مشبعة (اللون الأرجواني)، وهي شروط يصعب معها على الكائنات الحية تصنيع الأراكونيت وتؤدي إلى ذوبان الأراكونيت الذي تم تشكيله.

تشكل البتروبودات حلقة في سلسلة الغذاء في كامل المحيط الجنوبي. ويمكن أن تكون التغيرات كارثية بالنسبة إلى هذه الحيوانات (والحيوانات التي تعتمد عليها في غذائها) كما تبين الصور (في اليمين). تبين الصورة a تاكل سطح صدف البتروبود (التي وضعت لمدة 48 ساعة في مياه تحت مشبعة بالنسبة إلى الأراكونيت)، وتبين الصورة b هذا التاكل بصورة أوضح وبتكبير أكبر. أما الصورة c فتبين صدف لأحد البتروبودات لم تتعرض للذوبان.



The (RAGGED) Future of Aragonite (١٠)



تتضمن الكائنات الحية البحرية المعرضة للخطر من زيادة حموضة مياه المحيطات: المرجانيات والطحالب المرجانية التي توجد بصورة عامة في مجتمعات الشعاب المرجانية، إضافة إلى المنخربات وحاملات الكوكوليتات الموجودة بكثرة في معظم المياه السطحية. وهناك مجموعة أخرى مهددة هي القواقع البحرية الصغيرة التي تدعى البيروبودات وتعيش بصورة خاصة في المياه القطبية الباردة.



مرجان (مليپورا تيبلا)



طحالب مرجانية (مليپورا ألسيس)

الكائنات الحية في المناطق التي كانت لمدة طويلة معرضة إلى رقم هيدروجيني منخفض، مثل جزر كالاباغوس المحاطة بمياه غنية، بصورة طبيعية، بثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك فالاستراتيجية الثالثة تكمن في دراسة السجل الجيولوجي لأزمة وصلت فيها تراكيز ثاني أكسيد الكربون إلى مستويات أعلى مما هي عليه حالياً عندما كان الرقم الهيدروجيني، على الأرجح، أدنى - مثلاً خلال فترة المناخ الدافئ الشاذ التي حدثت قبل نحو 55 مليون سنة (فترة الحرارة العظمى الباليوسينية-الإيوسينية)، حينما انقرض الكثير من الكائنات الحية البحرية. وفي الوقت الحاضر يكمن قلق الكثير من العلماء في أن الزيادة الحالية في حموضة المحيطات تحدث بسرعة أكبر مما كانت عليه من قبل، لدرجة لم تترك للأنواع البحرية الوقت الكافي للتكيف معها. ومع أن التأثيرات قد تكون خفية، فإن التغيرات المثيرة في البيئة البحرية قد يتعذر تجنبها على ما يبدو.

#### المؤلف

Scott C. Doney

أستاذ في قسم كيمياء وجيوكيمياء البحار بمعهد وودز هول لعلوم البحار. وقد بدأ دراساته في علوم البحار عندما كان طالباً في مرحلة البكالوريوس بجامعة كاليفورنيا - سان دييغو، إلى أن حصل على شهادة الدكتوراه في كيمياء البحار عام 1991 بعد أن أنهى برنامجاً مشتركاً بين معهد ماساتشوستس للتقنية ومعهد وودز هول لعلوم البحار. وتعد خدماته في الفريق العلمي لمركز الكربون الإداري في الوكالة ناسا واحداً من نشاطاته المميزة، وهو رئيس مجموعة التوجيه العلمي لدراسة التغير المناخي وكربون البحار التي تعتبر جزءاً من البرنامج الأمريكي لأبحاث التغيرات العالمية.

#### مراجع للاستزادة

- Anthropogenic Carbon and Ocean pH. Ken Caldeira and Michael E. Wickett in *Nature*, Vol. 425, page 365; September 25, 2003.
- Anthropogenic Ocean Acidification over the Twenty-First Century and Its Impact on Calcifying Organisms. James C. Orr et al. in *Nature*, Vol. 437, pages 681-686; September 29, 2005.
- Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. Royal Society, 2005. Available at [www.royalsoc.ac.uk/displaypagedoc.asp?id=13314](http://www.royalsoc.ac.uk/displaypagedoc.asp?id=13314)

Scientific American, June 2006

كثيراً، فلا يتوقع البيولوجيون أن يزداد نمو هذه الكائنات الحية زيادة كبيرة. إن بعض النباتات الأرقى (مثل الأعشاب البحرية) يستخدم مباشرة ثاني أكسيد الكربون المذاب، ومن المحتمل أنه سيستفيد من مستوياته المرتفعة تماماً مثل النباتات الأرضية التي يزداد نموها عندما يزداد تركيز هذا الغاز في الغلاف الجوي.

كيف يمكن للعلماء أن يقيسوا بدقة استجابة النظم البيئية البحرية لعملية ازدياد حموضة المياه البحرية؟ إن معظم الجهود الحالية في هذا السياق تتركز على إجراء تجارب مختبرية لمدة قصيرة وعلى نوع واحد من الكائنات. إضافة إلى ذلك أجرى العلماء دراسات ميدانية محدودة لاختبار التأثيرات القاسية التي يمكن أن ترافق التخلص (بواسطة البشر) من ثاني أكسيد

بدأ العديد من الشعاب المرجانية مرحلة الانحدار، وقد يؤدي ازدياد حموضة مياه المحيطات إلى دفع بعض هذه الشعاب إلى الانقراض.

الكربون الجوي في مياه البحر العميقة، وهذه هي إحدى الاستراتيجيات المختلفة التي فُكر بها لعزل ثاني أكسيد الكربون بعيداً عن الغلاف الجوي [انظر: «هل يمكننا دفن الاحترار العالمي؟»، *العلوم*، العددان 11/10 (2005)، ص 44]. ومع أن هذا العمل غني بالمعلومات، فالتنائج لم تترجم بسهولة إلى فهم عواقب التعرض الطويل الأجل إلى رقم هيدروجيني منخفض قليلاً. كما أنه ليس صحيحاً أن نعم الدراسات المختبرية على كامل النظم البيئية، حيث تتفاعل كائنات حية مختلفة كثيرة.

وأحدى الإمكانيات لبلوغ تقييم أكثر واقعية للمشكلة، يكون في رفع مستويات ثاني أكسيد الكربون بصورة صناعية لمدة أشهر وستين في رقعة من المحيط أو في رصيف مرجاني. إن التجارب المتعلقة بتغيير مستويات ثاني أكسيد الكربون على مدى واسع قد تم تنفيذها بصورة عامة على اليابسة، ويقوم حالياً علماء بحار ومهندسون باستكشاف طريقة عملية (لوجيستية) لتوسيع هذا النهج على المحيطات. أما التكتيك الآخر فيمكن في دراسة كيفية



## جزيئات خضراء (صديقة للبيئة)<sup>(1)</sup>

اخترع الكيميائيون مجموعة جديدة من الحفازات يمكنها تدمير بعض أسوأ الملوثات قبل دخولها البيئة.

(J. T. كولنز) - <Ch> والقر>

الخضراء التابعة لجامعة ميلون كارنيغي [أحدنا (كولنز) هو مدير هذه المؤسسة] من تطوير مجموعة من الجزيئات المحفزة المصممة تدعى - لجنة حلقية ماكروية (كبيرة) رباعية الأميدو (TAML)<sup>(2)</sup>، وهي منشطات تعمل مع بيروكسيد الهيدروجين<sup>(3)</sup> وبعض المؤكسدات الأخرى على تفكيك تشكيلة متنوعة من الملوثات العنيدة. وتتنجز اللجان TAMLs تلك المهمة عن طريق محاكاة الدور الذي تقوم به الإنزيمات التي تطلقها أجسامنا مع مرور الوقت لمقاومة المركبات السامة. وبرهنت اللجان TAMLs، في المختبر وفي التجارب الميدانية، أنها تستطيع تدمير مواد خطرة مثل مبيدات الهوام والأصبغة وملوثات أخرى، مخفضة بذلك إلى درجة كبيرة رائحة ولون النفايات السائلة التي تطرحها معامل الورق وقاذلة بذلك الأبواغ البكتيرية الشبيهة بسلالة بكتيرة الجمرة الخبيثة الميتة. ويمكن إذا ما جرى تبني اللجان TAMLs هذه على نطاق واسع توفير ملايين الدولارات التي تنفق على التنظيف. إضافة إلى ذلك، فإن هذا النوع من الأبحاث يوضح أن بإمكان الكيميائياء الخضراء تخفيض بعض الدمار البيئي الذي تسببه الكيميائياء التقليديين.

التريليون (يعادل الجزء في البليون تقريبا حبة من الملح مذابة في حوض سباحة)، ومع ذلك يظن العلماء أن حتى هذه الكميات الضئيلة من بعض الملوثات يمكنها أن تفسد الكيميائياء الحيوية النماية التي تحدد السلوك البشري والذكاء والمناعة والتكاثر.

ولحسن الحظ فإن تباشير المساعدة بدأت تلوح في الأفق. ففي العقد الماضي، بدأ الباحثون في مجال الكيميائياء الخضراء الحديث العهد بالتخطيط لاستبعاد أخطار المنتجات الكيميائية ومعالجاتها. وقدم هؤلاء العلماء صيغا لبدائل أكثر أمانا لما هو مضر من الدهانات والپلاستيك وأخترعوا تقنيات تصنيع جديدة تقلل من طرح الملوثات في البيئة. وتبين مؤسسة الكيميائياء الخضراء المتفرعة من الجمعية الكيميائية الأمريكية أن المبدأ الأول لهذه الجماعة من الباحثين هو: «إن منع النفايات أفضل من معالجتها أو استبعادها بعد تكونها». وفي سياق هذا الجهد، قدم الباحثون كذلك اكتشافات تبشر بطرائق منخفضة التكلفة لإزالة العديد من الملوثات المستديمة من النفايات السائلة.

ونورد مثالا على هذا العمل، ما قام به الباحثون في مؤسسة كيميائي الأكسدة

لم تعد الأسماك التي تعيش في نهر أناكوستيا الذي يتدفق في قلب واشنطن العاصمة تستمتع كثيرا بمياهه. فهذا النهر ملوث ببقايا جزيئية من الأصبغة والپلاستيك والأسفلت ومبيدات الهوام<sup>(4)</sup>. فقد بينت الاختبارات الحديثة أن ما يصل إلى 68 في المئة من أسماك السلور القدي البنية<sup>(5)</sup> التي تعيش فيه مصابة بسرطان الكبد. ولذلك أوصى المسؤولون عن الحياة البرية بأن تعاد الأسماك التي يجري اصطيادها إلى النهر من دون أكلها، كما منعت السباحة فيه.

وبعد الأناكوستيا واحدا من عشرات الأنهار الشديدة التلوث في الولايات المتحدة. وتطرح صناعة النسيج وحدها 53 بليون غالون من الفضلات السائلة - المحملة بالأصبغة التفاعلية ومواد كيميائية خطيرة أخرى - في الأنهار ومجاري المياه الأمريكية كل عام. وقد أخذت أصناف جديدة من الملوثات تظهر في مياه الشرب في البلاد، وتتمثل في آثار من الأدوية ومبيدات الهوام ومواد التجميل وحتى هرمونات تحديد النسل [انظر الشكل في الصفحة 48]. وتكون كميات هذه المواد، في الغالب، لامتناهية في الصغر وتقاس بالأجزاء في البليون أو الأجزاء في

### الحاجة إلى أن نكون خضراء<sup>(6)</sup>

إن السبب الأساسي لتصعيدنا المشكلة

LITTLE GREEN MOLECULES (\*)  
Overview/ Catalysts for Cleaning (\*)

The Need to Be Green (\*\*): أي أن نكون من حماة

البيئة

pesticides (\*)

brown bullhead catfish (\*)

tetraamido macrocyclic ligand (\*)، والليجند (أو الربيط)

ligand هي جزيء، يتحكم في جزيء آخر، وجمعها لجانز

(4) أو فوق أكسيد الهيدروجين أو الماء الأكسجيني

(التحرير)

### نظرة إجمالية/ حفازات تساعد على عمليات التنظيف<sup>(7)</sup>

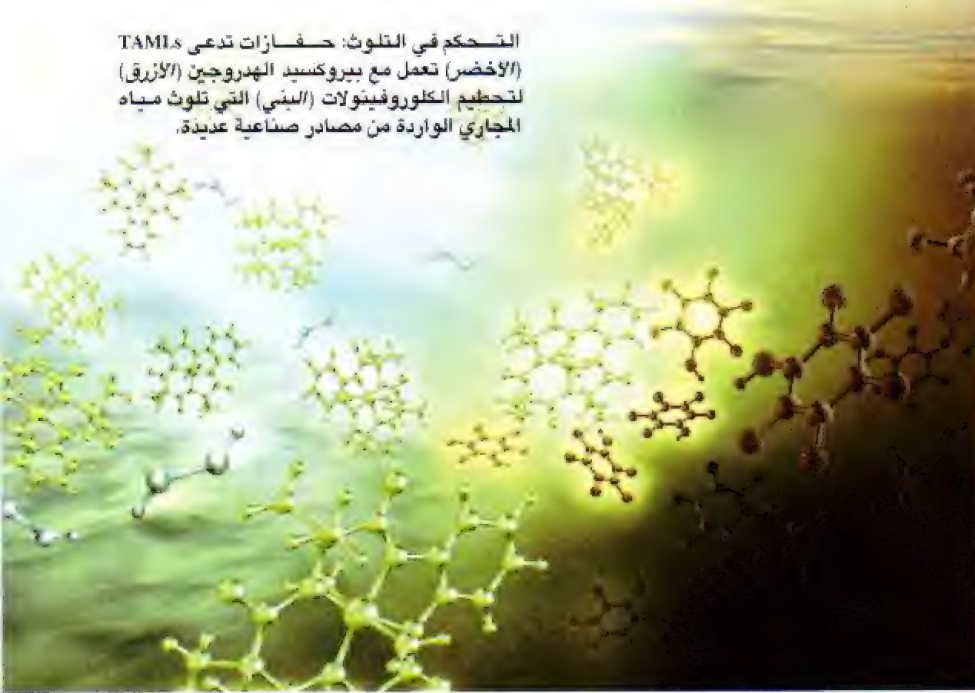
أصبحت الملوثات العديدة التي تطرح في مجاري المياه، مثل الأصبغة ومبيدات الهوام، موجودة في كل مكان، ومن ثم أخذت تشكل تهديدا جدبا لصحة البشر.

اخترع الكيميائيون حديثا حفازات تشبه الإنزيمات، وهي منشطات مكونة من لجانز ligands حلقية ماكروية رباعية الأميدو (اختصارا TAMLs) يمكنها تدمير الملوثات المعنودة بتسريع تفاعلات التنظيف مع بيروكسيد الهيدروجين.

عندما أضيفت الحفازات TAMLs إلى نفايات المياه الناتجة من مصانع عجينة الورق قامت بتخفيض محتواها من الكيميائيات الخطرة والمسببة للتلوث، ويمكن مستقبلا استعمال هذه الحفازات لتعقيم مياه الشرب والتصدي للتلوث الذي قد يحدثه هجوم إرهابي بيولوجي.



التحكم في التلوث: حفازات تدعى TAMLs (الأخضر) تعمل مع بيروكسيد الهيدروجين (الأزرق) لتحطيم الكلوروفينولات (البني) التي تلوث مياه المجاري الواردة من مصادر صناعية عديدة.



«كولينز» [في كارنيكي ميلون] إلى الثمانينات، عندما كان القلق من تأثير الكلور في الصحة العامة يتعاظم. وكان الكلور في ذلك الوقت ومازال حتى الآن المادة التي غالبا ما تستعمل في عمليات التنظيف والتعقيم التي تجرى على نطاق واسع في التصنيع، وكذلك في معالجة مياه الشرب. ومع أن المعالجة بالكلور رخيصة وفعالة، فإن بإمكانها تكوين بعض الملوثات الشديدة. لقد كان استعمال الكلور بشكله العنصري في مصانع الورق لتبييض عجينة الورق المصدر الرئيسي للديوكسينات المسببة للسرطان إلى أن منعت وكالة حماية البيئة هذه العملية في عام 2001. (نشير إلى أن معظم المصانع تبيض حاليا عجينة الورق بثنائي أكسيد الكلور الذي يخفض توليد الديوكسينات من دون أن يوقفه.) وكذلك جرى ربط بعض المنتجات الثانوية الناجمة عن كلورة ماء الشرب ببعض أنواع السرطان. أما الكلور بشكله الشائع في الطبيعة - أيونات الكلوريد أو أملاح منحلة في الماء - فإنه غير سام، ولكن عندما يتفاعل الكلور العنصري مع جزيئات أخرى يمكن أن يشكل مركبات تستطيع أن تفسد الكيمياء الحيوية للحيوانات الحية. فمثلا، تعيق الديوكسينات التنامي الخلوي بتدخلها في منظومة استقبال تنظم إنتاج بروتينات أساسية.

ونتساءل هل يمكن استعمال عوامل التنظيف التي تعتمد على البيئة (بيروكسيد

paramcium (١)

(٢) شجر حرجي من الفصيلة الصنوبرية قد يصل طوله إلى ثلاثة أقدام.

التعرض السابق للولادة لمادة الفثالات phthalates، وهي مركبات تستعمل في البلاستيك ومستحضرات التجميل، يمكن أن يحدث تغييرا في الجهاز التناسلي لذكور القوارض الحديثة الولادة. وفي عام 2005 بينت «Sh» سوان» [من كلية الطب وطب الأسنان في جامعة روشستر] تأثيرات

## الكيمياء الخضراء (صديقة البيئة) تستطيع تخفيف بعض المضار البيئية التي تسببها الكيمياء التقليدية.

مشابهة في أطفال ذكور. وفي دراسة أخرى ترأسها «سوان» تبين أن الذكور الذين يعانون انخفاضاً في تعداد النطاف والذين يعيشون في المناطق الريفية الزراعية بولاية ميسوري لديهم مستويات مرتفعة من مبيدات الأعشاب (مثل الألكلور والألترازين) في البول. فإذا ما بدأنا من معاملنا ومزارعنا وصرفنا الصحي نجد أن الملوثات المستديمة يمكن أن تجول، محافظة على بنيتها، في الهواء والماء وعبر السلسلة الغذائية لتعود مباشرة إلينا في معظم الأحيان.

ويقوم الكيميائيون الأخضر في الجامعات والشركات، بهدف مواجهة هذا التحدي، بالبحث في جدوى إيجاد بدائل أكثر صداقة للبيئة تحل محل أكثر المنتجات وعمليات التصنيع سمية [انظر الإطار في الصفحة 50]. تعود بداية العمل الذي قام به فريق

البيئية هو أن الناس يمارسون الكيمياء بطرق تختلف عن تلك التي تمارسها الطبيعة: إذ ركز تطور العمليات البيوكيميائية عبر الزمن بشكل رئيسي على استعمال العناصر المتوافرة والقريبة التناول - مثل الكربون والهيدروجين والأكسجين والنيتروجين والكبريت والكالسيوم والحديد - لتكوين كل شيء، من الباراميسسيوم<sup>(١)</sup> إلى شجرة الكويه<sup>(٢)</sup> redwood ومن سمكة المهرج clown fish إلى الإنسان. أما صناعاتنا فإنها على العكس من ذلك، تقوم بجمع العناصر من كل بقعة من بقاع الأرض وتوزعها بطرق لا يمكن للعمليات الطبيعية أن تقوم بها. فعلى سبيل المثال، من المعروف أن الرصاص يوجد غالبا في توضعات معزولة وثابتة بحيث لم تضمّنه الطبيعة قط في الكائنات الحية. أما اليوم فالرصاص منتشر في كل مكان، ويعود سبب ذلك بشكل رئيسي إلى أن صناعات الدهان والسيارات والحواسيب قد أسهمت في نشره. وعندما يجد الرصاص طريقة للانتقال إلى الأطفال يصيبهم بسمية شديدة حتى في الجرعات الصغيرة جدا. وينطبق الأمر ذاته على الزئبق والكادميوم والزئبق واليورانيوم

والبلوتونيوم. فهذه العناصر هي ملوثات مستديمة لا تتفكك في أجسام الحيوانات ولا في البيئة - لذلك تبرز الحاجة الملحة إلى إيجاد بدائل أكثر أمانا.

تختلف بعض الجزيئات التركيبية الجديدة في الأدوية والبلاستيك ومبيدات الهوام عن منتجات الكيمياء في الطبيعة إلى درجة تبدو فيها تلك الجزيئات كما لو أنها سقطت علينا من عالم خارجي. فالعديد من هذه الجزيئات لا يتفكك بسهولة، حتى ما كان منها بيولوجي التدرّك (التقوض) biodegradable، صار موجودا أينما نظرت بسبب إفرانها في استعماله. وتبين الأبحاث الحديثة أن بعض هذه المواد يمكن أن يتدخل في التعبير الطبيعي normal expression للجينات ذات الصلة بتطور جهاز التناسل الذكوري. فمن المعروف لدى العلماء منذ بضع سنوات، أن



مصنع نسيج  
أصبغة

مصنع عجينة الورق  
كميرات ليكتين ملونة،  
كلورينات عضوية

مزرعة  
مبيدات عشبية،  
مبيدات الهوام،  
فضلات  
الحيوانات،  
أدوية

مجرى  
أصبغة  
مستحضر  
تجميل  
عقاقير

باتي تلوث المياه من عدة مصادر، لكن الحفازات TAMLs المكتشفة حديثا تستطيع تدمير بعض أسوأ الملوثات قبل وصولها إلى الأنهار والبحيرات. فمثلا، يمكن بإضافة الحفازات TAMLs إلى نفايات مياه مصانع النسيج وعجينة الورق تفكيك الأصبغة والكلورينات العضوية والكيماويات الخطرة الأخرى. ويمكن أيضا استعمال الحفازات TAMLs لمعالجة المياه التي تُفرغ من برك النفايات الزراعية وكذلك من مياه الصرف الصحي السكنية، والتي تحتوي على الأصبغة الناتجة من استعمال آلات الغسيل وعلى آثار من المواد الصيدلانية الضارة التي تفرز في بول البشر.

## تعمل الحفازات سواء كانت طبيعية أو من صنع الإنسان عمل الخاطبات في بعض المجتمعات القديمة.

(تسمى أيضا تفاعلات الأكسدة). يستعمل هذا الحفاز الموجود في كبد الإنسان الأكسجين لتخريب عدد كبير من الجزيئات السامة الداخلة عن طريق التنفس أو الطعام بفعالية وكفاءة كبيرتين.

ومنذ عقود يجهد الكيميائيون في بناء جزيئات تركيبية (صناعية) صغيرة يمكنها أن تضاهي تلك الإنزيمات المذهلة. وعندما يتمكن العلماء من إيجاد هذه الجزيئات المصممة التي تمتلك قدرة محفزة قوية، يصبح بإمكانهم الاستغناء عن تقانات الأكسدة القائمة على الكلور أو ذات الأساس المعدني التي تولد الكثير من الملوثات. وفي أوائل الثمانينات، لم يكن الحظ قد حالف أحدا لتطوير نسخ من هذه الإنزيمات في المختبرات؛ أما الطبيعة فقد قامت على مدار بلايين السنين من التطور بوضع الحان بعض الرقصات المحفزة الشديدة التعقيد والرائعة الأناقة، جاعلة جهودنا في المختبر تبدو

١٦) بمعنى حفاز كيميائي حيوي يزيد بمقدار كبير سرعة التفاعل.  
pyralin (٢٠)  
sugars (٣٠)

المكونة لها. ولولا وجود الإنزيمات لكانت حركة الكيمياء الحيوية تجري بمعدل بطيء أشد البطء، ومن ثم لاستحال وجود الحياة بالشكل الذي هي عليه.

وفي الطبيعة يتم استخدام الإنزيمات المسماة بيروكسيدازات في تحفيز التفاعلات التي يدخل فيها بيروكسيد الهيدروجين، وهو المادة الكيميائية المألوفة منزليا والمستعملة في صبغ الشعر وإزالة البقع عن السجاد، وتوظف الفطور التي تنمو حول جذوع الأشجار العفنة في الغابات، البيروكسيداز لتحطيم بوليميرات الليكتين lignin الموجودة في الخشب فتتشرط الجزيئات الكبيرة متحولة إلى جزيئات أصغر يستطيع الفطر أكلها. وتوجد أيضا عائلة أخرى من الإنزيمات تسمى السيتوكرومات p450s تحفز التفاعلات التي يدخل فيها الأكسجين

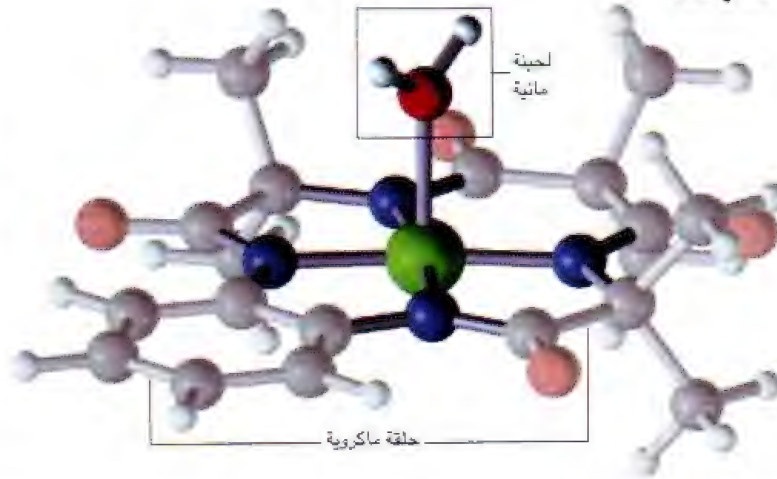
الهيدروجين والأكسجين) في تنقية المياه وتخفيض النفايات الصناعية بدل الاعتماد على الكلور. بالتأكسد، يمكن أن يؤدي استعمال مادتي التنظيف هاتين كليا وبأمان وقوة إلى منع تشكل العديد من الملوثات، ولكن في الطبيعة تتطلب هذه العملية وجود إنزيم<sup>(١)</sup>. تقوم الحفازات سواء كانت طبيعية أو من صنع الإنسان بدور الخاطبات في بعض المجتمعات القديمة، إلا أنها بدل الجمع بين زوجين من البشر، توحد بين جزيئات معينة مؤدية بذلك إلى تمكين وتسريع حدوث التفاعل بين تلك الجزيئات. ويمكن لبعض الأنواع من الحفازات الطبيعية أن تزيد سرعة حدوث التفاعل بليون ضعف. فلولا وجود إنزيم البتيالين<sup>(٢)</sup> في لعابنا لوجب انقضاء أسابيع قبل أن يتمكن جسمنا من «تكسير» المعكرونة وتحويلها إلى السكاكر<sup>(٣)</sup>



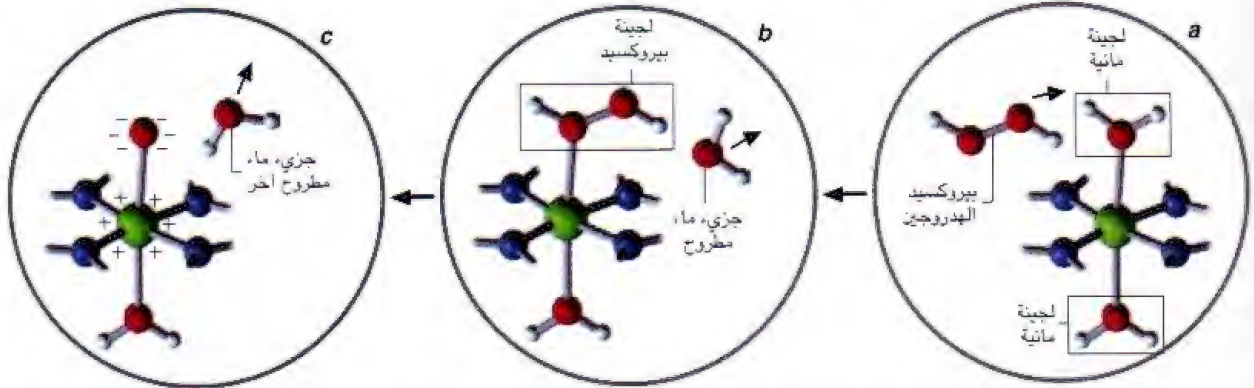
## آلة غسيل جزيئية<sup>(\*)</sup>

صمم الكيميائيون حفازات TAMLs تقلد الإنزيمات الطبيعية التي تحفز تفاعلات يدخل فيها بيروكسيد الهيدروجين. ولكن الحفازات TAMLs أصغر بمئات المرات من الإنزيمات، مما يجعلها أرخص وأسهل تصنيعاً

### حفاز TAML

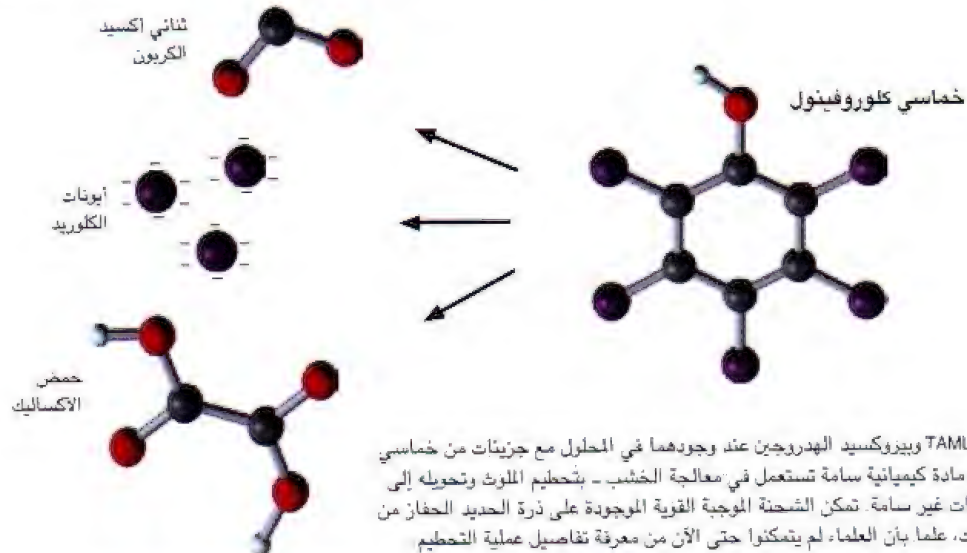


يوجد في مركز كل الحفازات TAMLs ذرة حديد ترتبط بأربع ذرات نتروجين، ويوجد عند الحافة حلقات كربونية يتصل بعضها ببعض مشكلاً حلقة خارجية كبيرة تدعى حلقة مأكروية (كبيرة). ويقوم نظام الوصل هذا بدور جدار ناري مكسب الجزيء القدرة على تحمل التفاعلات العنيفة التي يطلقها. يمتلك الحفاز TAML في حالته الصلبة أيضاً جزيء ماء ( $H_2O$ ) متصلاً بذرة الحديد (الزمر المتصلة تدعى لجائن ligands)



البيروكسيد عن ذرتي الهيدروجين التابعتين لها وذرة أكسجين على شكل جزيء ماء، مخلقة ذرة أكسجين واحدة متصلة بالحديد (c). يسحب الأكسجين الإلكترونات باتجاه أبعد عن ذرة الحديد جاعلاً الحفاز TAML مركباً وسطاً فعالاً

عندما يذوب جزيء TAML في الماء يرتبط جزيء  $H_2O$  آخر بالحفاز (a). وإذا وجد بيروكسيد الهيدروجين في المحلول أيضاً، فإنه يحل جزيء ماء محل إحدى اللجائن المائية ذات الاتصال الضعيف فتطرح بسهولة (b). وعندئذ تتخلّى لجينة



يقوم الحفاز TAML وبيروكسيد الهيدروجين عند وجودهما في المحلول مع جزيئات من خماسي كلوروفينول - مادة كيميائية سامة تستعمل في معالجة الخشب - بتحفيز الملوث وتحويله إلى مركبات وأيونات غير سامة. تمكن الشحنة الموجبة القوية الموجودة على ذرة الحديد الحفاز من تحطيم الملوثات، علماً بأن العلماء لم يتمكنوا حتى الآن من معرفة تفاصيل عملية التحطيم



## الكيمياء تتحول إلى خضراء<sup>(\*)</sup>

يعد اختراع الحفازات TAMLs واحداً من إنجازات الكيمياء الخضراء العديدة، التي تبذل جميع إمكاناتها في تطوير منتجات وعمليات تصنيع تخفف أو تزيل استعمال أو توليد المواد الخطرة. ونورد فيما يلي بعض هذه الإنجازات:

المشروع	المشاركون	الوضع
استعمال السكر الموجود في النباتات لصنع حموض البولولي لأكتيك (PLAs)، وهي زمرة من البوليميرات المتفككة حيوريا يمكنها أن تحل محل البلاستيك المشق من النفط	P. كروبر، L. R. هوارد، J. كولستاد، M. C. راين، C. R. بوب [الشركة نيتشرواركس LLC (فرع من كاركيل)].	بنت الشركة نيتشرواركس مصنعا في نيراسكا لتصنيع حبيبات PLA التي تستعمل في تصنيع قوارير تعبئة المياه ومواد التغليف ومنتجات أخرى.
اكتشاف تفاعلات تصنيع يمكن عند تطبيقها في الإنتاج استعمال الماء بدلا من العديد من المذيبات العضوية التي قد يسبب بعضها السرطان.	Ch. جان لي، جامعة ماكجيل.	تدرس شركات الأدوية وشركات الكيمائيات السلعية عمليات التصنيع.
تطوير كيمياء الاستبدال للوصول إلى طرائق تركيب عضوية تنتج الأدوية والبلاستيك وكيمائيات أخرى بكفاءة أكبر ونفايات أقل.	H. R. كريس [مؤسسة كاليغورنيا للتقانة، R. R. شوك] مؤسسة ماساشوسيتس للتقانة، U. شوقين [المؤسسة الفرنسية للنفط].	هذا النوع من الأبحاث مطبق على نطاق واسع في الصناعات الكيمائية والتقانة الحيوية والصناعات الغذائية، وفي عام 2005 حصل على جائزة نوبل في الكيمياء.
الاستعاضة عن المذيبات ذات الأساس النفطي السامة بثلاثي أكسيد الكربون فوق الحرج - وهو مائع في درجة حرارة وضغط عالين ويتصف بخواص السوائل والغازات معا.	M. بولالكوف، M. جورج، S. هاويل [جامعة نوتنكهام في إنكلترا].	TH. سوان وشركاه، شركة تصنيع بريطانية مختصة بإنتاج الكيمائيات ذات الأغراض الخاصة، شيدت مصبعا يقوم على استعمال الموانع فوق الحرجة.
اختراع طريقة جديدة لإنتاج سيرترالين، المكون الرئيسي في تصنيع مضاد الاكتئاب زولوفت.	J. سيفين، D. تابور، D. كولبيرك، D. فيزيتير [الشركة فايزر].	هذه العملية الصناعية تُخفض التلوث وكذلك الطاقة والماء، اللازمين، في حين تحسن من أمان العمال ومردود الإنتاج.

المقاومة ازدادت فائدة الحفاز. ولم تكن نرغب طبعا في أن نخترع حفازا غير قابل للتخرب، فينتهي به المطاف في المسيلات المائية المتدفقة في البيئة، وهذا قد يؤدي إلى خلق مشكلة تلوث خاصة به. إن جميع حفازاتنا TAMLs الحديدية الحالية (في هذه الحفازات يمثل الحديد ذرة المعدن المركزية) تتفكك في فترة زمنية ما بين دقائق وساعات إن بناء جدران نارية من اللجائن لم يكن عملا سهلا، إذ تطلب تطوير دورة تصميم مرهقة ذات أربع مراحل: أولا، بدأنا بتحويل وتصنيع بنى لجينية يؤمل منها أن تستطيع الحفاظ على ديمومة الجدار الناري. ثانيا، أخضعنا الحفاز إلى إجهاد تأكسدي استمر إلى أن تخرب الجدار الناري. ثالثا، فتشنا بدقة عن الموقع الذي بدأ فيه حدوث التقويض (وجدنا أن التقويض اللجيني كان يبدأ دائما عند أكثر المواقع ضعفا). وأخيرا، بعد أن حددنا الوصلة الأضعف استبدلنا بها مجموعة من الذرات نعتقد أنها ستتحمل مدة أطول ويعدها بدانا من جديد كامل دورة التصميم

Chemistry Goes Green (\*)  
Catalytic Converters (\*\*)

جزئية من الزمر العضوية، أي يجب أن نقوي البنيان المعماري الجزيئي لمثل هذه الزمر لتتمكن من تحمل النار السائلة الناتجة من تنشيط بيروكسيد الهيدروجين. وباستفادتنا مما صممته الطبيعة في هذا المجال، توصلنا في نهاية المطاف إلى حل هذه المسألة بتصنيع حفاز تتوضع فيه ذرة مفردة من الحديد في وسط مربع تقع على رؤوسه أربع ذرات من النيتروجين [انظر الإطار في الصفحة 49]. ترتبط ذرات النيتروجين بذرة الحديد الأكبر بكثير منها بروابط تكافئية، بمعنى التشارك في زوجين من الإلكترونات. وفي مثل هذه البنية، تسمى الذرات الأصغر والزمر المرتبطة المحيطة بذرة المعدن المركزية لجائن legands. وقمنا بعد ذلك بوصل اللجائن لتشكيل حلقة خارجية كبيرة سمينها الحلقة الماكروية (الكبرية) macrocycle. وبمرور الوقت تعلمنا كيف نجعل اللجائن ومنظومات الوصل ذات قوة كافية لتحمل التفاعلات العنيفة التي تقدمها اللجائن TAMLs. أما في الواقع، فإن اللجائن التي ابتكرناها تقوم بدور جدار ناري يقاوم النار السائلة، وكلما طالت هذه

أمامها ضئيلة. ومع ذلك فإننا ندرك عدم إمكان تحقيق هدفنا في تخفيض التلوث ما لم نجد طريقة لتقليد هذه الرقصات الجزيئية.

### المحاولات المحقزة<sup>(\*\*)</sup>

وكذلك فإن تكوين الإنزيمات التركيبية يعني تجميع جزيئات يمكنها أن تصمد، بحيث تستطيع مقاومة التفاعلات الإتلافية التي يتم تحفيزها. فكل العمليات التي يشارك فيها الأكسجين يمكن أن تكون تخريبية، لأن الروابط التي يرتبط بها مع العناصر الأخرى (وبخاصة الهيدروجين) قوية جدا. كما يعد بيروكسيد الهيدروجين ( $H_2O_2$ ) مؤكسدا قويا، لأن كل جزيء من جزيئاته يقع في موقع وسط ما بين الماء ( $H_2O$ ) والأكسجين الجزيئي ( $O_2$ ). ونشير إلى أنه غالبا ما يولد بيروكسيد الهيدروجين في الماء نوعا من النار السائلة تدمر جميع الجزيئات العضوية (تحتوي على الكربون) التي حولها. وتوضح بنية الإنزيمات أن الحصول على حفاز قادر على العمل ربما يلزمه وضع ذرة من الحديد داخل مصفوفة



ذلك أن نواته تجذب معظم الإلكترونات الموجودة في رابطة المعقد باتجاهها بعيدا عن نواة الحديد. فيزيد هذا التأثير الشحنة الموجبة للحديد في مركز الحفاز TAML جاعلا المركب الانتقالي المتفاعل (RI) على درجة من التفاعل كافية لاستخلاص الإلكترونات من الجزيئات القابلة للتأكسد الموجودة في المحلول، لكن لم نستطع بعد معرفة كيف يحطم المركب الانتقالي المتفاعل (RI) الروابط الكيميائية للأهداف التي يهاجمها، إلا أن الأبحاث الجارية قد تعطي قريبا الإجابة. ونحن نعرف أننا نستطيع تعديل قوة الحفاز TAML عن طريق تغيير الذرات الموجودة عند رأس الجزيء، وذيله، واضعين عناصر ذات كهروسلبية عالية جدا في هذين الموضعين فتتفرغ شحنة سالبة أكثر من الحديد ويصبح المركب المتفاعل أكثر شراسة.

### مصدر القوة الصناعية<sup>(1)</sup>

إن بناء المركبات TAMLs في المختبر شيء، وتثبيتها لتصبح صالحة للاستعمال التجاري شيء آخر. وتبدو نتائج الفحوص المخبرية والتجارب الميدانية واعدة. فقد بينت الاختبارات التي مولتها مؤسسة العلوم الوطنية أن الحفاز TAML مع البيروكسيدات يمكن أن يزيل التلوث الناجم عن هجوم إرهابي بيولوجي. ووجدنا بالجمع ما بين الحفاز TAML وبيروكسيد هيدرو ثالثي البوتيل<sup>(2)</sup> (نوع آخر من بيروكسيد الهيدروجين) تُستبدل بإحدى ذرتي الهيدروجين فيه ذرة كربون وثلاث زمر ميثيل (CH<sub>3</sub>) أن المحلول الناتج يمكن أن يعطل في 15 دقيقة نحو 99.9999 في المئة من *Bacillus atrophaeus*، وهي نوع من البكتيريا المشابهة جدا للجمرة الخبيثة. ونأمل مستقبلا تحقيق تطبيق محتمل مهم جدا وهو استعمال الحفازات TAMLs الحديدية وبيروكسيد الهيدروجين لتوفير معقم رخيص الثمن يستطيع القضاء على الميكروبات المعدية (الخامجة) التي تعيش في المياه والمسؤولة عن الكثير من الأمراض والوفيات في العالم.

لقد قمنا بثلاث تجارب ميدانية لتقصي مدى قدرة الحفازات TAMLs على تخفيف التلوث الناجم عن تصنيع الورق: إذ إن

أخرى بدور مشعل لهبي يحرق بشراسة معظم المواد الكيميائية القابلة للتأكسد والتي توجد متلازمة معه. وهناك مركبات TAMLs أخرى أقل شراسة من سابقتها وأكثر انتقائية بحيث يمكنها مثلا مهاجمة بعض أجزاء الجزيئات فقط أو مهاجمة الجزيئات الأكثر قابلية للتأكسد في المجموعة. ونتوقع أن نهين الحفازات TAMLs لتعزيز تقدم الكيمياء الخضراء في العقود القادمة. وتدل النتائج - التي أمكن الحصول عليها حتى الآن، على الرغم من وجوب إجراء المزيد من اختبارات السمية - على أن الحفازات TAMLs تفكك الملوثات وتحولها إلى مكوناتها غير السامة فلا تترك وراءها أي

## إن تكوين الحفازات TAMLs في المختبر شيء، ولكن الشيء الأهم هو تجهيزها للاستخدام التجاري.

تلوث يمكن كشفه. ونملك اليوم أكثر من 90 براءة اختراع دولية تخص الحفازات TAMLs، وهناك المزيد منها في الطريق. يضاف إلى ذلك ما نملك من تراخيص تجارية عديدة.

ومما يثير الاهتمام، أننا مازلنا لا نعرف جميع تفاصيل الطريقة التي تعمل وفقها الحفازات TAMLs، مع أن دراسات حديثة قدمت استبصارات عميقة عن التفاعلات الأساسية. تحتوي الحفازات TAMLs الحديدية في الحالة الصلبة على جزيء ماء واحد يتصل بذرة الحديد على شكل لجينة، ويتوجه عموديا إلى اللجانن النتروجينية الأربع. وعندما يكون المركب في محلول يرتبط جزيء ماء آخر بالجهة المقابلة لذرة الحديد. وتكون هذه اللجانن المائية ضعيفة الارتباط جدا، بحيث إذا وجد في المحلول كذلك بيروكسيد الهيدروجين فإن جزيئا منه يحل بسهولة محل أحد جزيئات الماء. وهنا سرعان ما تستعيد لجينة البيروكسيد ترتيب نفسها طاردة ذرات الهيدروجين التابعة لها وذرة أكسجين واحدة (تطرد على شكل H<sub>2</sub>O: جزيء ماء) مخلقة ذرة أكسجين واحدة مرتبطة بالحديد في مركز المركب TAML الحديدي الذي يدعى عندئذ المركب الانتقالي المتفاعل (RI)<sup>(3)</sup>.

إن الأكسجين أكثر كهروسلبية electronegative بكثير من الحديد، ويعني

وأخيرا بعد 15 سنة من العمل ابتدعنا أول لجينة TAML قادرة على العمل، فلقد عرفنا في صباح أحد الأيام أننا نجحنا وذلك عندما قام < هورويتز > [وهو أستاذ باحث في مؤسستنا] بعرض نتائج تجربة التبييض bleaching باستخدام أفضل ما كنا صممناه في ذلك الوقت. وفحصنا النتائج وكان الأمر جليا، فكلما رش < هورويتز > صبغا قاتما في محلول يحتوي على الحفاز TAML وبيروكسيد الهيدروجين يصير المحلول بسرعة عديم اللون. لقد عرفنا حينها أن جدراننا النارية صارت أخيرا قادرة على التحمل فترة تكفي للسماح للحفاز TAML بالقيام بعمله. لقد نجحت

هذه الجزيئات في أداء دور الإنزيمات، مع أنها كانت أصغر بكثير جدا: يبلغ الوزن الجزيئي للحفاز TAML نحو 500 دالتون (يساوي الدالتون الواحد 1/12 من كتلة الكربون 12، وهو أكثر نظائر الكربون وفرة)، في حين يبلغ الوزن الجزيئي لبيروكسيداز الجرجار (فجل حار)، وهو إنزيم صغير نسبيا، نحو 40 000 دالتون. لذلك فإن الحفازات TAMLs الشديدة الصغر أسهل تصنيعا وأرخص وذات فعاليات أكثر تنوعا بكثير من نظيراتها الطبيعية.

ومنذ ذلك الوقت قمنا بتصنيع أكثر من 20 نوعا مختلفا من الحفازات TAMLs بإعادة تطبيق نفس عملية التصميم ذات الأربع مراحل التي مكنتنا من اكتشاف أول نموذج قادر على العمل. ونشير إلى أن كل حفاز TAML يتصف بأنه ذو عمر وسرعة تفاعل خاصين به، وذلك يسمح لنا أن نصنع حفازات وفق المهمات التي نريدها منها. هذا وتتضمن معظم الحفازات عناصر مثل الكربون والهيدروجين والأكسجين والنتروجين والحديد، وهي عناصر تم انتقاؤها بسبب سميتها المنخفضة. ونطلق اسم «الحفازات TAMLs الصيادة» على بعض الجزيئات لأنها صُممت لتبحث عن ملوثات أو كائنات ممرضة محددة فتعطها بنفس الطريقة التي يبحث فيها اللغم المغنطيسي عن الهيكل المعدني للسفينة. وتقوم مركبات TAMLs

Industrial Strength (+)  
reactive intermediate (1)  
tertiary butyl hydroperoxide (2)



صناعة الورق وعجينة الورق تنتجان سنويا أكثر من 100 مليون طن متري من العجينة البيضاء التي تتحول إلى ورق أبيض. وتطلق عدة مصانع هذه العجينة إضافة إلى الديوكسينات والكلوروفينولات والكلورينات العضوية organochlorines الأخرى، سائلا بلون القهوة يصيب الجداول والأنهار ويمنع الضوء من التغلغل ضمن المياه. ويؤثر نقص كمية الضوء هذا في التركيب الضوئي، ويؤثر ذلك بدوره في المتعضيات الحية التي تعتمد على النبات في غذائها. وتعود مشكلة التلون إلى وجود كسرات كبيرة ملونة من الليكنين، وهو البوليمير الذي يربط خيوط السيللوز في الخشب. يؤدي التبييض باستعمال ثنائي أكسيد الكلور إلى إزالة الليكنين من السيللوز، فتتضمن البكتيريا والمتعضيات الحية الأخرى كسرات الليكنين الصغيرة في أحواض المعالجة، وأما القطع الأكبر فلا يجري أكلها لكبرها وينتهي بها المطاف إلى الأنهار والبحيرات.

قمنا باختبار فعالية الحفازات TAMLs الحديدية في إزالة لون تلك الكسرات في مصنفين لعجينة الورق في الولايات المتحدة ومصنع واحد في نيوزيلندا. وفي نيوزيلندا جمعنا الحفازات TAMLs الحديدية والبيروكسيد مع 50 000 لتر من الماء المقذوف. أما في الولايات المتحدة فقد حققنا بشكل مباشر الحفازات TAMLs الحديدية في برج معالجة العجينة أو في أنبوب الخروج عدة أيام بغية تبيض النقاية المائية. ووجدنا إجمالا أن الحفازات TAMLs الحديدية خفضت تلون المياه بنحو 78 في المئة وأزالت 28 في المئة من الكلورينات العضوية.

وكذلك يبدو مثيرا تطوير تطبيقات أخرى للحفاز TAML. فقد وجد «E. جايجر» [من منظومات Urethane Soy وهي شركة توجد في الفولغا، جنوب داكوتا] أن الحفازات TAMLs الحديدية تستطيع بشكل ممتاز تحويل زيت فول الصويا إلى بوليميرات مفيدة تتصف بخواص فيزيائية تساوي - إن لم تكن تتفوق على - خواص منتجات البولي يوريثان الراهنة. ويمكن أن تشق الحفازات TAMLs طريقها للاستعمال في الغسالات الآلية. لقد وجدنا في سلسلة أخرى من التجارب أن إضافة كمية قليلة جدا من الحفاز إلى بعض مساحيق الغسيل تلغي الحاجة إلى فصل الملابس البيضاء عن الملونة في عملية الغسيل.

لأن الحفازات TAMLs قادرة على منع انتقال اللون، وذلك بمهاجمة ذرات الصباغ عندما تنفصل عن خيوط القماش الملون وقبل أن تلتصق بنسيج القماش الآخر. ونقوم حاليا بالعمل على تطوير جملة جديدة من الحفازات TAMLs قادرة على كسر الروابط الجزيئية المستقرة جدا التي تمكّن العقاقير والكيميائيات الزراعية من الانتقال من دون تغيير إلى مياه الشرب.

ولكننا لم نستطع حتى الآن، على الرغم من نجاح تلك التجارب، الوصول إلى الإجابة عن جميع الأسئلة التي تتعلق بالحفازات TAMLs، إذ يتعين إجراء المزيد من الاختبارات التي تتعلق بالتهينة الصناعية، إضافة إلى أهمية التأكد من أن الحفازات TAMLs لن تنتج بعض أشكال التلوث التي لم نستطع اكتشافها بعد. فغالبا ما تبدو التقانات الكيميائية سليمة جدا عندما تسوق أول مرة، ولا تصبح عواقبها السلبية المدمرة واضحة إلا بعد مرور عقود من الزمن على استعمالها. ونحن نريد أن نفعل ما بوسعنا لتجنب أي مفاجآت قد تخفيها الحفازات TAMLs.

والتكلفة هي أيضا قضية يجب بحثها. فمع أن الحفازات TAMLs تبدو واعدة في معظم تطبيقاتها، فقد قامت الشركات الكبيرة باستثمارات هائلة في العمليات الكيميائية الصناعية التي تستخدمها حاليا. فالتحول إلى أنظمة وتقنيات جديدة، حتى لو كانت مفيدة، يتطلب استثمارات ليست بالقليلة.

## المؤلفان

Terrence J. Collins - Chip Walter

يعملان معا على تثقيف الجمهور في التحديات والإمكانات التي تمتلكها الكيمياء الخضراء. «كولينز» هو أستاذ توماس لورد في الكيمياء بجامعة كارنيكي ميلون، وهو مدير مؤسسة كيمياء الأكسدة الخضراء فيها، وهو كذلك أستاذ شرف في جامعة أوكلاهو بنينزلندا. أما «والتر» فهو صحافي في العلوم ومؤلف كتاب عصر الفضاء وأنا أعمل على ذلك (مع «W. شاتنر»)، ويدرس موضوع الكتابة العلمية في جامعة كارنيكي ميلون وهو نائب رئيس الاتصالات في المركز الطبي لجامعة بيتسبرغ.

## مراجع للاستزادة

Toward Sustainable Chemistry. Terrence J. Collins in Science, Vol. 291, No. 5501, pages 48-49; January 5, 2001.

Rapid Total Destruction of Chlorophenols by Activated Hydrogen Peroxide. Sayam Sen Gupta, Matthew Stadler, Christopher A. Noser, Anindya Ghosh, Bradley Steinhoff, Dieter Lenoir, Colin P. Horwitz, Karl-Werner Schramm and Terrence J. Collins in Science, Vol. 296, pages 326-328; April 12, 2002.

More information can be found online at [www.cmu.edu/greenchemistry](http://www.cmu.edu/greenchemistry) and [www.chemistry.org/portal/a/c/s/1/acsdisplay.html?DOC=greenchemistryinstitute\index.html](http://www.chemistry.org/portal/a/c/s/1/acsdisplay.html?DOC=greenchemistryinstitute\index.html)

Scientific American, March 2006



محوره. هذا وإن المقارب الحديثة مدعومة بقاعدة أشد ترابطاً تسمى الارتفاع/السمت<sup>(1)</sup> (يشير هذا المصطلح إلى حركة ذات بعدين بدلا من الدوران البسيط حول المحور). والظرف غير الواسع هنا هو ضرورة استعمال آلية تحكم أشد تعقيدا، لكن الحواسيب جعلتها أسهل تناولا. لكن حتى بوجود قاعدة الارتفاع/السمت، يتطلب المقرب الذي قطره 100 متر رقبة باهظة الثمن. أضف إلى ذلك أن المحاكيات الحاسوبية توحى بأن كل بنية ضخمة قد تولد جييا خاصا من الاضطراب الهوائي. لذا لن يتطلب المقرب OWL سوى سقف منزلق ليغطيه خلال النهار أو في الطقس السيئ. وسيعمل المقرب في الهواء الطلق، وستطيع تحمل رياح معتدلة الشدة تصل سرعتها إلى 15 مترا في الثانية (نحو 30 ميلا في الساعة). وفي الحقيقة، يخفض النسيم الثابت الاضطراب الهوائي.

قد تبلغ تكلفة المقرب OWL، الذي حجمه (أي قطر مرآته الأولية) 100 متر، قرابة 1.2 بليون دولار. أما تكلفة المقرب TMT فتقدر بنحو 700 مليون دولار، وتكلفة المقرب GMT تقدر بنحو 400 مليون دولار. هذا وإن كل مبلغ يصل إلى نحو بليون دولار يظل أقل مما تتطلبه معظم التجارب الفضائية، لكنه يبقى مع ذلك مبلغا كبيرا من المال. ومن المحتمل أن التعاون الدولي سيكون ضروريا لتوفيره.

## البانوراما الفلكية<sup>(2)</sup>

كان العقد الماضي عصرا ذهبيا لعلم الفلك، لكننا نتوقع حدوث المزيد من التقدمات حتى عام 2015. فالمكتشفات detectors المتطورة والبصريات التكيفية ستعزز قدرات الجيل الحالي من المقارب التي تراوح أقطارها ما بين 8 و 10 أمتار، وهذا يشبه إلى حد بعيد، ما أضافته آلات التصوير والطيفيات<sup>(3)</sup> الجديدة من قدرات إلى مقرب هبل. وستكون آلات قياس التداخل<sup>(4)</sup> قد تطورت من حيوانات غريبة إلى أحصنة شغل تتعقب أجراما ذات ضوء باهت جدا يصل مئزها إلى جزء من مئليانية قوسية<sup>(5)</sup>. وسيكون

عملي، لكنه ينطوي على مجازفة من الفاحشيتين التقنية والمالية. وحاليا، أعكف مع زملائي، بمساعدة مجموعة كبيرة من الفلكيين، على وضع تصميم مشترك أصغر، ومن المتوقع صدور قرار بهذا الشأن بحلول نهاية هذا العام. ومن ثم فالمشاريع المختلفة قد تكون متقاربة بعضها من بعض. وبوجه خاص، فإن المقرب TMT ذاته هو نتيجة دمج عدة تصاميم سابقة.

وعلى مدى قرون، تطور كبر المقارب التي كانت في البداية بحجم طاولة صغيرة توضع بجانب السرير، ثم صارت بحجم الغرفة، ثم البيت، ثم الكاتدرائية، والآن بحجم ناطحة سحاب. وبفضل التقدمات التقنية الحديثة، يمكننا بناء آلات قادرة على رؤية أول نجوم ولدت في الكون والكواكب المحيطة بنجوم أخرى، ومن المحتمل أن يكون ضمنها كواكب شبيهة بأرضنا. ولم يعد السؤال يدور حول قدرتنا على بناء مقارب عملاقة أو حول سبب رغبتنا في بنائها، إنما السؤال المطروح يتعلق بوقت بنائها وبحجمها.

The Astronomical Panorama (1)  
altitude/azimuth (2)  
spectrometers (3)  
interferometry (4)  
submilliarcsecond (5)  
dish antennas (6)

## المؤلف

Roberto Gilmozzi

باحث رئيسي في المجموعة التي تعكف على دراسة تصميم المقرب OWL شغل بين عامي 1999 و 2005 منصب مدير المرصد Very Large Telescope Observatory المقام في سيرو بارانال بجمهورية تشيلي وتتضمن اهتماماته العلمية دراسة المستعرات الأعظمية وبقاياها وإشعاع الخلفية الكونية للأشعة السينية وتاريخ التكون النجمي في الكون

## مراجع للاستزادة

- OWL Concept Study. R. Gilmozzi and P. Dierckx in *ESO Messenger*, No. 100, pages 1–10; June 2000. Online at [www.eso.org/projects/owl/publications/2000\\_05\\_Messenger.htm](http://www.eso.org/projects/owl/publications/2000_05_Messenger.htm)
- Astrophysical Techniques*. Fourth edition. C. R. Kitchin. Taylor & Francis, 2003.
- Proceedings of Second Bäckaskog Workshop on Extremely Large Telescopes*. Edited by A. L. Ardeberg and T. E. Andersen. *Proceedings of the SPIE*, Vol. 5382; July 2004.
- The Light Brigade*. Neil deGrasse Tyson in *Natural History*, Vol. 115, No. 2, pages 18–29; March 2006.
- Exploring the Cosmic Frontier: Astrophysical Instruments for the 21st Century*. ESO Astrophysics Symposia. Springer-Verlag (in press). [www.mpifr-bonn.mpg.de/berlin04/](http://www.mpifr-bonn.mpg.de/berlin04/)

Scientific American, May 2006



# طاقة لدفع طائرة فضائية<sup>(١)</sup>

إن ابتكار محرك نفاث متطور قادر على دفع طائرة فضائية إلى مدارها بطريقة روتينية وبتكلفة معقولة هي مهمة صعبة، لكنها على ما يبدو قابلة للنجاح.

<A. Th. جاكسون>



يوما ما، قد تتمكن المعززات الصاروخية المدارية الثنائية المراحل، مثل هذه الطائرة الفضائية الحربية الافتراضية كويك سات Quicksat، من إرسال أشخاص وأجسام إلى الفضاء بتكلفة أقل من تكلفة الصواريخ الحالية. وسوف يكون تحقيقها ممكنا بواسطة محركات الاحتراق التضاغية فوق الصوتية<sup>(١)</sup> الناجحة - أي محركات سكرامجت.



الصلبة، اللذين يجب نقلهما إلى الجو لمواصلة عملية احتراق الوقود الصاروخي طوال الرحلة إلى المدار المحدد.

يمكن أن يقدم المحرك النفث التضاغطي فوق الصوتي (الفوضوتي)<sup>(١٧)</sup>، المعروف باسم محرك سكرامجت (scramjet)، أحد الحلول لهذه المسألة، وهو محرك يمكنه أن يغترف الأكسجين من الغلاف الجوي أثناء مرحلة الصعود. ويعني اختصار بعض الوزن نتيجة سحب الهواء خلال مدة الطيران عوضا عن حمله من الأرض، أن يصبح محرك سكرامجت قادرا على توليد دفع يعادل أربعة أضعاف الدفع الذي يولده أي صاروخ لكل باوند من وزن وقود الدفع المستهلك. وأخيرا، يبدو أنه أصبح بالإمكان، بعد مضي عقود من التطوير المتواصل، الاعتماد على محركات سكرامجت المستخدمة مباشرة مرحلة الطيران. ويخطط الباحثون للقيام بين عامي 2007 و 2008 باختبارات حاسمة على الأرض لهذه المحركات بحجمها الطبيعي، فضلا عن عزمهم في عام 2009 على القيام بسلسلة من الاختبارات أثناء الطيران، الهدف منها تحطيم بعض الأرقام القياسية.

وبخلاف الصاروخ الذي يخترق الجو مباشرة نحو المدار، يفترض أن الطائرة، التي تسييرها محركات سكرامجت، سترتفع في الجو مثل أي طائرة عادية، مستخدمة قوة الرفع التحريكي الهوائي<sup>(١٨)</sup> التي يولدها جناحها وجسمها، وهذا يجعلها أكثر

منذ مدة طويلة، يطمح المهندسون إلى بناء طائرة يمكنها أن تنطلق من مدرج وتطلق عاليا، ثم تعود ثانية إلى الأرض - على غرار ما تفعله طائرة لوك سكايبوكر Luke Skywalker المقاتلة المتصالبة الجناحين (بشكل الحرف X) في سلسلة أفلام «حرب النجوم». إلا أن أمرا واحدا كان يعترض سبيلهم: إن المحركات النفثية تحتاج إلى الأكسجين لحرق الوقود، في حين لا يوجد في طبقات الجو العليا كمية كافية منه لاستدامة عملية الاحتراق. لذا فإن الطيران نحو الفضاء يتطلب دفعا صاروخيا لحمل كل من الوقود والمادة المؤكسدة على متن المركبة. وحتى في مكوك الفضاء الذي يعتبر أكثر أنظمة الإطلاق الحالية تطورا، فإن قرابة نصف الوزن عند الإطلاق يكون مخصصا للأكسجين السائل والمادة المؤكسدة

POWER FOR A SPACE PLANE (\*)  
supersonic combustion ramjet (١٧)

supersonic jet (١٨)



قدرة على المناورة وأكثر أماناً (فيما حدث عطل في محركاتها، فإن المركبة تستطيع الهبوط إلى الأرض من دون الاستعانة بمحركات). ويُفترض أن هذه الطائرة تُقلع من الأرض، وتبلغ سرعات فوق صوتية باستخدام المحركات النفاثة التقليدية (بداية السرعات فوق الصوتية هي 1 ماخ، أي 760 ميلاً في الساعة عند مستوى سطح البحر). ويُفترض بعدئذ أن تتولى محركات سكراجت زمام الأمور، وتدفع الطائرة لبلوغ السرعات فوق الصوتية - من 5 ماخ إلى 15 ماخ (الحد النظري لأداء محرك سكراجت). أخيراً، يُفترض أن تقوم محركات صاروخية صغيرة بتسريع الطائرة، مع حملتها الإجمالية، على طول المسافة المتبقية إلى المدار. والمعروف أن سرعة 5 ماخ تعادل خمسة أضعاف سرعة الصوت، أي زهاء ميل واحد في الثانية. وعلى سبيل

المدي، متيحة بذلك الفرصة، مثلاً، لقطع المسافة بين مدينتي نيويورك وسيدني خلال ساعتين. وهناك عدد كبير من مجموعات البحث المنتشرة في كافة أنحاء العالم، التي تعمل على مواجهة التحديات التقنية الهائلة، المتعلقة بتحقيق طيران فوق صوتي بوساطة محركات سكراجت. وسوف أركز في مقالي هذه على برنامج محركات سكراجت، الذي ينفذه سلاح الجو الأمريكي والشركة برات أند ويتني للتقانة فوق الصوتية Pratt & Witny Hypersonic Technology (برنامج هاي تك HyTeck)، وهو البرنامج الذي أظن أنني خبرته أكثر من سواه. وهناك جهود حديثة كثيرة أخرى في التطوير، تقوم بها حالياً كل من البحرية الأمريكية ووكالة الفضاء الأمريكية (NASA) ووكالة مشاريع الأبحاث الدفاعية المتقدمة (DARPA)، إضافة إلى فرق هندسية تعمل

## يوما ما، قد تتمكن محركات سكراجت من تسيير طائرة ركاب بين نيويورك وسدني في مدة لا تتجاوز ساعتين.

في أستراليا والمملكة المتحدة واليابان وفي أمكنة أخرى من العالم [انظر الجدول في الصفحة 58].

### الطريق إلى الطيران<sup>(1)</sup>

لا يُعد محرك سكراجت مفهوماً جديداً في تقانة الدفع. ويعود تسجيل أولى براءات الاختراع الخاصة به إلى الخمسينات من القرن العشرين. وفي أواسط الستينات، أُجريت عدة اختبارات في مرافق على الأرض لعدد من محركات سكراجت بسرعات بلغ أقصاها 7.3 ماخ. كذلك، قامت شركات جنرال إلكتريك ويوناييد تكنولوجيز<sup>(2)</sup> وماركارت<sup>(3)</sup> ومختبر الفيزياء التطبيقية في جامعة جون هوبكنز ومركز أبحاث لانغلي التابع للوكالة ناسا (NASA)، ببناء محركات تعمل، بشكل أساسي، على حرق الهيدروجين (وهو نفس الوقود المستخدم في صواريخ الدفع في مكوك الفضاء وفي عدد كبير من المعززات الصاروخية التي تعمل بالوقود السائل)، وفي أواسط الثمانينات، أطلقت حكومة الولايات المتحدة الأمريكية برنامج الطائرة الفضائية الوطنية National Aerospace Plane، التي تسيّر بوساطة محركات سكراجت. غير أن المشروع ألغي في عام 1994، بعد أن ناهز حجم الأموال المولفة فيه بليون دولار، وذلك كجزء من إجراءات تخفيض الميزانية الذي نفذ بعد انتهاء الحرب الباردة. وفي عام 2004، أكملت وكالة الفضاء الأمريكية برنامجها المسمى Hyper-X، عندما نجحت طوال بضع ثوانٍ في تشغيل محركين من نوع سكراجت يعملان بوقود الهيدروجين، لكل منهما سرعة وارتفاع محدودان. وفي أواخر العام نفسه، سجلت مركبة البحث X-43A المزودة بمحرك سكراجت، سرعة قياسية بلغت قيمتها 9.6 ماخ [انظر الإطار في الصفحة 59]. وتنصب جهود سلاح الجو الأمريكي حالياً على استخدام تقانة الجيل الجديد من محركات سكراجت بغية تسريع المركبة لبلوغ مدى معين من السرعات والارتفاعات

المقارنة، فإن أسرع طائرة مأهولة تعمل بسقط الهواء<sup>(4)</sup>، وهي طائرة بلاك بيرد Blackbird SR-71 التابعة لسلاح الجو الأمريكي، لم تتمكن من تخطي سرعة مقدارها 3.2 ماخ تقريباً.

وقد تؤدي مثل هذه القدرات إلى حصول ثورة في عالم الطيران. فقدرة طائرة فضائية على الطيران مثل أي طائرة عادية، قد تسهم نسبياً في جعل هذا النوع من الرحلات أمراً روتينياً، وتُفضي بذلك إلى إحداث انخفاض كبير في تكاليف إرسال الأشخاص أو الأشياء إلى مدار حول الأرض. كما أن الأداء الهائل لهذا المحرك الجديد سوف يمكن الطائرة الحربية، أو الصاروخ، من إلقاء القنابل فوق أي هدف على الأرض، مهما كان موقعه وذلك خلال وقت أسرع بكثير مما هو ممكن في الوقت الحاضر؛ حتى إن محركات سكراجت قد تتمكن يوماً ما، من تسيير طائرات ركاب فوق صوتية بعيدة

### نظرة إجمالية/ المحركات فوق الصوتية<sup>(5)</sup>

- تستطيع محركات الاحتراق التضاغلية فوق الصوتية، أو محركات سكراجت، أن تدفع الصواريخ وغيرها من الأسلحة والطائرات الفضائية، وحتى طائرات الركاب البعيدة المدى، بسرعات فوق صوتية - من 5 إلى 15 ماخ (يساوي 1 ماخ سرعة الصوت، أي ما يعادل 760 ميلاً في الساعة عند مستوى سطح البحر).
- تقوم محركات سكراجت بسقط الهواء ومزجه في الوقود، ثم تحرق المزيج لتوليد دفع دسري<sup>(6)</sup> هائل. وهي، خلافاً للصواريخ، ليست بحاجة إلى حمل الأكسجين ومادة مؤكسدة، وبذلك تحقق انخفاضاً في الوزن وتعطي نسبة دفع أكبر أربع مرات لكل وحدة من وزن المادة الدايرة.
- على الرغم من التصميم البسيط لمحرك سكراجت - إذ إنه لا يحتاج إلى عجلات توربينية دوارة - فإن التحديات التقنية التي يفرضها صنع محرك قادر على العمل في أنظمة طيران مختلفة ولفترات زمنية طويلة، تعترضها عقبات شتى.

The Road to Flight (1)  
propulsive thrust (2)  
Marquardt (3)

Overview/ Hypersonic Engines (4)  
air breathing (1)  
United Technologies (3)



## فئة من محركات الطيران<sup>(\*)</sup>

تنتمي محركات سكرامجت إلى فئة المحركات النفاثة. التي تعمل وفقا لمبادئ مماثلة. وعموما يولد كل محرك دفعا دسريا بواسطة ضغط الهواء الداخل، ومزجه في الوقود، ثم حرق المزيج وطرد نواتج الاحتراق من طرفه الخلفي.

### محرك سكرامجت (من 4.5 إلى 15 ماخ)



الوقود الكيميائية إلى طاقة حرارية. يعمل المسار الداخلي المتضغوط على احتباس المزيج المتفج الذي تكون درجة حرارته مرتفعة. فترتفع قيمة ضغطه أكثر. وعندما تصل الغازات المنبعثة إلى الفوهة، حيث يصبح المسار أعرض، تتمدد الكتلة وتتسارع متجهة إلى الخارج، وتحول طاقتها الحرارية إلى طاقة دفع حركية.

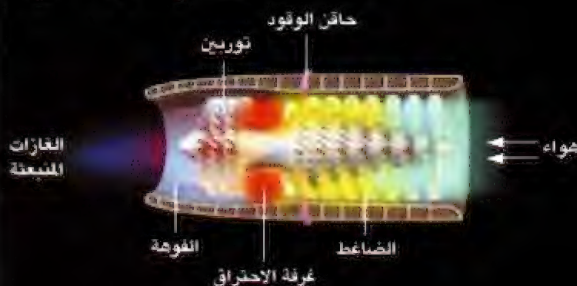
يدخل الهواء بسرعة فوق صوتية من منفذ الدخول، حيث يسبب المسار المتضيق للدق تضاعفا ram للهواء - أي تباطؤ وانضغاطه، ومن ثم تحويل جزء من طاقته الحركية إلى حرارة. تضخ المحاقن (البخاخات) الوقود في الهواء داخل غرفة الاحتراق، حيث يبدأ المزيج الذي مازالت سرعته فوق صوتية بالاحتراق بسرعة، فتتحول طاقة

### محرك رامجت (2.5 إلى 5 أو 6 ماخ)



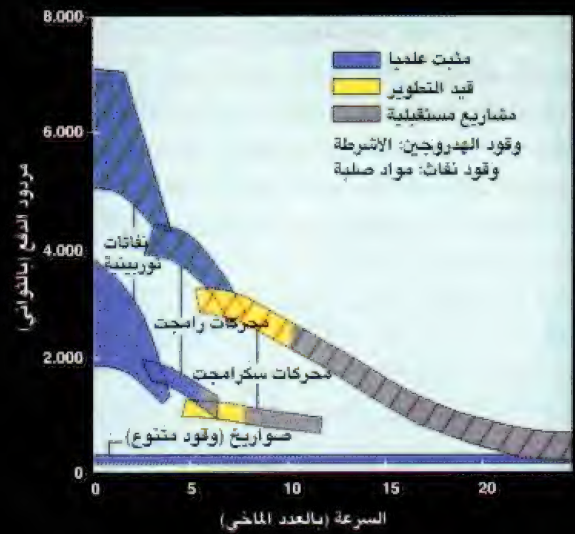
يشبه عمل المحرك النفاث المضغطي (رامجت) عمل محرك سكرامجت، إلا أن دق الهواء الداخلي فيه يبقى بسرعات دون صوتية.

### محرك نفاث توربيني (0 إلى 3 ماخ)



لما كان المحرك النفاث التوربيني يسير بسرعة أبطأ، فإنه يحتاج إلى عجلات توربينية دوارة لضغط الهواء الداخل وتوليد قوة الدفع.

### نوافذ الأداء



يكون تصميم كل محرك مناسباً على أفضل وجه لمجموعة من ظروف سرعة المركبة وارتفاعها. ويوفر وقود الهيدروجين أداء أفضل للمحرك، لكنه يطرح بعضاً من المشكلات المتعلقة بتعيينته في حيز صغير، وبالبنية التحتية الحالية لتوزيع الوقود. أما الوقود النفاث الهيدروكربوني، فإن التعامل معه أسهل، لكنه يعطي مقداراً أقل من الطاقة لكل وحدة وزن. والمعروف أن مردود الدفع، وهو قياس للفعالية النسبية للمحرك، يساوي الدفع النفاث لكل وحدة وزن من معدل دق الوقود الداسر.



## بعض برامج البحث والتطوير في مجال محركات سكرامجت<sup>(\*)</sup>

إضافة إلى برنامج هايتك HyTeck وبرنامج المركبة الايضاحية لمحرك سكرامجت X-51A التابعين لسلح الجو الأمريكي [انظر المقالة الرئيسية]، هناك محاولات بحثية وطنية ودولية أخرى تهدف إلى تطوير تقانة محركات سكرامجت.

البرنامج	المواعيد	المؤسسة	الإنجازات
Hyper-X	2004-1996	ناسا	انصبت الجهود في مشروع Hyper-X (X-43A) على تسيير مركبات اختبارية لإثبات عمل محركات سكرامجت، التي تعمل بالهيدروجين. وأحد الاختبارات أثناء الطيران بلغت سرعة المركبة X-43A قرابة 10 ماخ
HyShot	2001 - حتى وقتنا الحاضر	جامعة كوينزلاند في أستراليا [بدعم من شركاء آخرين في أستراليا والمملكة المتحدة وألمانيا وكوريا الجنوبية واليابان]	في الشهر 2002/7، أجرى فريق HyShot أول اختبار ناجح من نوعه الطيران لمحرك سكرامجت، وقد طار باتجاه الأسفل بسرعة بلغت نحو ماخ مدة ست ثوان.
البرنامج الايضاحي للطيران فوق الصوتي (HyFly)	2002 - حتى وقتنا الحاضر	وكالة الأبحاث الدفاعية المتقدمة (DARPA) ومكتب الأبحاث البحرية (ONR)	يقوم البرنامج HyFly بصنع صاروخ من نوع كروز يسير بمحركات راجمت أو سكرامجت. وقد طور مختبر الفيزياء التطبيقية في جامعة هيوكنز هذا المحرك لاستخدامه في الطائرة المزودة بمحركات صاروخ
تقنية اختبار سكرامجت في الطيران الحر في الفضاء (FASTT)، بإشراف المشروع (HyFly)	2003 - حتى وقتنا الحاضر	Alliant Techsystems (بدعم من الوكالة DARPA والمكتب ONR)	في 2005/12/10، بلغت المركبة المزودة بمحرك سكرامجت، الذي يعبر بوقود الكيروسين سرعة قدرها 5.5 ماخ خلال طيران مدته 15 ثانية
Falcon	2003 - حتى وقتنا الحاضر	الوكالة DARPA	ينص برنامج فالكون على بناء طائرة حربية فوق صوتية بدون طيار، تستطيع أن تبلغ أي نقطة على كوكب الأرض في غضون ساعتين. ويحتمل يكون لهذه التقنية، في نهاية المطاف، تطبيقات غير عسكرية، ويحتمل تسهم في تطوير طائرة فضائية مدارية أحادية المرحلة.

وفوهة [انظر الإطار في الصفحة 57]. يقوم منفذ الدخول الذي يصمم خصوصاً لمحرك راجمت، بتكثيف ضغط الهواء، وفي الوقت نفسه بإبطاء سرعته إلى سرعات دون صوتية. وتقوم المحاقن (البخاخات) injectors بضخ الوقود إلى دفق الهواء، ومن ثم يشتعل مزيج الهواء والوقود ويحترق. وتتسارع غازات الانفلات<sup>(\*)</sup> الساخنة من جديد إلى أن تبلغ سرعة الصوت تقريباً عند مرورها عبر عنق ضيق، يسمى الخائق الميكانيكي<sup>(\*)</sup>، ثم تندفع بعد ذلك من خارج الفوهة المخروطية الشكل بسرعات فوق صوتية. وفي الوقت الذي يرتفع فيه العدد الماخ<sup>(\*)</sup> Mach number للطائرة إلى أكثر من 5، يؤدي تباطؤ الهواء في منفذ الدخول إلى ارتفاع درجة الحرارة داخل المحرك إلى نقطة يصعب معها زيادة المردود الحراري زيادة فعالة عن طريق الاحتراق ولهذا السبب، تعتبر السرعة التي تقع بين 5 ماخ و6 ماخ الحد العملي لعمل محرك راجمت

### التركيب الداخلي لمحرك سكرامجت<sup>(\*\*)</sup>

كي يتمكن محرك سكرامجت من توليد دفع دسري أكبر من الدفع الذي يوافره محرك راجمت، وكي يعمل بسرعة طيران أعلى من سرعته، يجب أن تنخفض فيه قيمة الانضغاط الأولي لدفق الهواء، بحيث لا تتباطأ سرعته بنفس المقدار تقريباً - في الحالة المثالية، يحافظ المحرك على سرعة فوق صوتية طوال عملية الاحتراق. وعلى غرار محرك راجمت، لا يوجد في محرك سكرامجت قطع متحركة في مسار دفق الهواء؛ إذ إنه مكون، أساساً، من أنبوب

وتزويد المحرك بوقود الهيدروكربون السائل والاستعانة بنفس الوقود لتبريد هيكل المحرك.

تنتمي محركات سكرامجت إلى فئة يُطلق عليها اسم المحركات النفائة التي تعمل بسفط الهواء والتي تتوقف المجالات المتنوعة للسرعات والارتفاعات التي تعمل فيها على تغييرات في مبدأ أساسي من مبادئ توليد الدفع. ويوجه عام، تعمل المحركات النفائة عن طريق ضغط الهواء الجوي، ومزج هذا الهواء في الوقود، وحرق المزيج، ثم طرد نواتج الاحتراق من مؤخر المحرك لتوليد قوة الدفع. والمعروف أن معظم طائرات الركاب العادية والتجارية تسير بوساطة محركات توربينية غازية تتضمن المكونات الأساسية الخمسة التالية: منفذ دخول الهواء air in take؛ وضغط (وهو عجلة مؤلفة من عدد من سطوح الانسياب الهوائية المركبة حول محور للدوران) مهمته سقط الهواء وزيادة ضغطه؛ وغرفة احتراق combustor يجري فيها حقن الوقود وحرقة؛ وعجلة توربينية تدور عندما تتدفق غازات الاحتراق الساخنة عبر سطوحها الانسيابية فيدور معها محور عجلة الضاغط؛ وقوهة تندفع من خلالها الغازات المتبعثة الشديدة الحرارة لتوليد قوة الدفع. وبإستطاعة المحركات النفائة التوربينية الحالية أن تزود الطائرة بطاقة تمكنها من بلوغ سرعات أعلى من 3 ماخ بقليل [انظر الإطار في الصفحة 57]. أما في السرعات التي هي أكثر ارتفاعاً، فإن المكونات التي تدور تصبح معرضة للتلف الناجم عن التسخين المفرط الذي تتعرض له.

عندما تتجاوز قيمة السرعة 2.5 ماخ تقريباً، لا يعود المحرك النفائات بحاجة إلى ضاغط أو توربين إذا كان تصميمه يسمح بتعرض الهواء الذي يدخل فيه لعملية تضاضاط ram-compression؛ لذلك لا يوجد في المحرك التضاضاطي (راجمت) إلا منفذ لدخول الهواء وغرفة للاحتراق

Anatomy of a Scramjet (\*\*)  
mechanical choke (٢)

Selected Scramjet R&D Programs (+)  
exhaust gases (١١)





تتوافر محركات سكرامجت بأشكال مختلفة، لكنها تحتاج جميعها إلى صواريخ تمكنها من بلوغ سرعة تجعلها قادرة على الإقلاع. فمركبة البحث X-43A - التابعة للوكالة ناسا، التي تشبه الطائرة العادية [في الأعلى] والتي سجلت في الشهر 2004/11 سرعة قياسية لمحرك نفث يعمل بسفط الهواء (9.6 ماخ، أي زهاء 7000 ميل في الساعة) أطلقت من صاروخ بيكاسوس الخاص بالعلوم المدارية<sup>(1)</sup>. أما محركات سكرامجت في المشروع هايشوت MyShot، فقد أطلقت من على متن صواريخ ترير أوربيون Terrier-Orion [في أقصى اليمين]، بنفس الطريقة التي أطلق بها محرك سكرامجت FASTT ذو التصميم المماثل، والذي يظهر في أحد التطبيقات المستقبلية للصواريخ الحربية [في الوسط].



القصيرة التي يمكث خلالها الهواء داخل المحرك - بضعة أجزاء من الملي ثانية، إذ تصبح مهمة حرق الوقود أشبه بإشعال عود ثقاب في عاصفة وإبقائه مشتعلًا بطريقة ما. وتكمن البراعة في تشغيل محرك سكرامجت في الهندسة الداخلية المتطورة جدا للأنبوب، وفي تحديد الموقع الذي تطلق منه الحرارة بفعل الاحتراق على طول هذا الأنبوب. فمحرك سكرامجت العملي يولد قوة دفع مستقرة عن طريق التحكم الدقيق في سرعة وضغط الهواء المتدفق عبر المحرك، وعن طريق معايرة كمية الوقود التي تدخل إلى غرفة الاحتراق لكي تحترق بأكملها وتطلق الكمية المطلوبة بدقة من الطاقة. ويعد الضبط الدقيق للعلاقة بين مساحة الدفع وكمية الحرارة المنطلقة سببا لإلغاء الحاجة إلى وجود خائق ميكانيكية في محرك رامجت، وللسماح لمحرك سكرامجت بالحفاظ على دفق فوق صوتي عبر غرفة الاحتراق.

وفي مجال محركات سكرامجت، يدرك الباحثون أن المعالجة الدقيقة للطاقة الحرارية في المحرك أمر بالغ الأهمية. فالحرارة تتدفق إلى بنية المحرك نتيجة عمليتي الاحتكاك والاحتراق. ويمكن لموجات الصدم الداخلية، التي ترتطم بجدران المحرك، إجراء تضخيم موضعي كبير لهذا التدفق الحراري، فالطاقة الحركية للدفق الهوائي فوق الصوتي الممتص، إذا ما تحولت بأكملها إلى طاقة حرارية، هي أكبر بكثير مما يتطلبه انصهار الهيكل المعدني للمحرك. ومع ذلك، فمن دون درجة كافية من التباطؤ، يقوم الهواء بالانتقال عبر المحرك بسرعة كبيرة وبدرجة حرارة ويضغط شديدي الانخفاض يمنعانه من مؤازرة احتراق الوقود.

ويلجأ المهندسون إلى استخدام طرق «التبريد القاعل» لمنع

Orbital Sciences Pegasus (1)

متضيق يتخذ شكل قمعين متصلين في طرفيهما الضيقين [انظر الإطار في الصفحة 57]. وأثناء التشغيل، يتحول الهواء الذي يدخل بسرعة فوق صوتية من منفذ الدخول (القمع الأول) إلى هواء مكيف الضغط وساخن. وفي منطقة الدفق المتضيق الواقعة في الممر الأوسط (غرفة الاحتراق)، يُحقن الوقود في الهواء المتدفق ويشتعل، وهذا يسبب تسخينًا إضافيًا للغاز. وتندفع الغازات المتولدة المنفلتة من خارج الفوهة (القمع الثاني) بسرعة فائقة أعلى من سرعة الهواء الداخل إلى المحرك.

ومثلما تفعل بعض أسماك القرش التي تسبح إلى الأمام من دون توقف كي تحافظ على إمداداتها من الأكسجين، يتعين على محرك رامجت، أو محرك سكرامجت، أن يتقدم بسرعة كبيرة لإجبار الهواء على الاندفاع بقوة في منفذ الدخول قبل أن يتمكن من الإقلاع وتوليد قوة الدفع. هذا وإن الحاجة إلى بلوغ لحظة بدء الإقلاع تعني أن مركبة الإطلاق المدارية، التي تسير بواسطة محركات سكرامجت، يجب أن تتضمن نظامًا آخر للدفع، كأن يكون صاروخًا أو محركًا توربينيا غازيا، يمكنها من مباشرة حركتها. وعندما تبلغ المركبة سرعتها المطلوبة، يفترض أن يقوم قائد الطائرة الفضائية بتشغيل محرك سكرامجت لمتابعة الرحلة نحو الطبقات العليا للجو، حيث يتولى أحد الصواريخ إكمال مرحلة الدخول النهائي في المدار. ويعد تصميم نظام للدفع، يجمع بين مختلف دورات المحرك، مسألة من مسائل الاستمثال optimization التي تتأثر بعوامل مثل حجم الحمولة الإجمالية والمدار المقصود والمدى والسرعة اللازمين للسفر في الغلاف الجوي والقدرة على نقل الأسلحة.

وتتمثل الصعوبة الرئيسية في عمل محرك سكرامجت بالمدة





في عام 2009، سوف تقوم مركبة الببيان العملي لمحرك سكرامجت X-51A [في الأعلى] بإجراء اختبار أثناء الطيران على تقانة لمحرك سكرامجت وهيكله الهوائي، يشرف عليها برنامج سلاح الجو الأمريكي HyTech. وفي الآونة الأخيرة، استكملت مجموعة من الاختبارات الأرضية على آخر نموذج أولي [في اليمين] لمحرك سكرامجت، التابع لسلاح الجو الأمريكي، في نفق مخصص لدرجات الحرارة العالية، يبلغ طوله ثمانين قدماً، وذلك في مركز أبحاث الوكالة ناسا في لانكلي. وقد أجرى المهندسون اختبارهم على المحرك وهو مقلوب رأساً على عقب، بغية تحديد خطوط سير الأنابيب والأجهزة عبر القاعدة الواقعة في أسفله.

البرنامج هايترك HyTech، التابع لسلاح الجو الأمريكي، الذي انطلق عام 1995، فقد تركّز التعاون في البرنامج هايترك، بين العلماء والمهندسين الحكوميين والصناعيين والجامعيين، على ما كان يمثل، باعتقاد الفريق، جزءاً قابلاً للمعالجة من التحديات الهندسية لمحرك سكرامجت، وكان تركيز عمل الأعضاء، أولاً، على محركات سكرامجت الصغيرة القابلة لزيادة الحجم، كذلك المستخدمة في الصواريخ، ويُفترض في هذا المحرك أن يكون صغيراً بحيث يناسب حجم مرافق الاختبارات المقامة على الأرض، ومن ثم يسهل القيام بتقييم تقني له. ويُفترض فيه أيضاً أن يعمل مرة واحدة فقط، مرجحاً بذلك حل الصعوبات الإضافية، الناجمة عن تطوير بُنى طيرانية قابلة لإعادة الاستعمال، إلى بحث لاحق. وقد استطاع هذا البرنامج أن يقلل من مستوى التعقيد في التصميم إلى حده الأدنى، عن طريق حصر نطاق التشغيل بين 4 ماخ و 8 ماخ، واعتماد مسار تدفق ذي شكل هندسي ثابت.

ولتشغيل محرك هايترك، وقع أخيراً اختيار أعضاء الفريق على الوقود النفثات JP-7، وهو سائل هيدروكربوني جرى تطويره أساساً لبرنامج المركبة بلاك بيرد. وكما أشرنا سابقاً، ففي محرك سكرامجت المبرد بالوقود، يؤدي الوقود دور مصصرف أو بالوعة حرارية - وهي الوسيلة التي يمكن بواسطتها التحكم في كمية الحرارة الزائدة. ففي أي نظام متوازن حرارياً، ينبغي ألا تزيد كمية الوقود، اللازمة لامتصاص الحرارة الفائضة في الهيكل، على كمية الوقود الضرورية لعملية الاحتراق. ويرغب مصممو محرك هايترك في أن يحدث هذا التوازن في سرعة قدرها 8 ماخ، وقد برهن الوقود JP-7 على أن استعماله ملائم جداً في هذه المهمة.

وكي تتمكن وحدة توليد الطاقة، التي تعمل بسفط الهواء، من أن تنافس بجدارة فعالية مركبة إطلاق تعمل بوساطة الصواريخ، فقد بينت الدراسات المتعلقة بالأداء أنها يجب أن تكون قادرة على العمل جيداً عند بلوغ سرعة تعادل نصف سرعتها القصوى تقريباً. ولهذا السبب، سعى المهندسون لبلوغ سرعة قدرها 4 ماخ، واعتبارها السرعة التي يبدأ بها إقلاع محرك سكرامجت، علماً أنها سرعة صعبة المنال، لأن درجة حرارة الهواء الذي يدخل إلى حجرة الاحتراق بتلك السرعة هي أدنى بكثير من درجة الحرارة التي

انصهار هيكل المحرك نتيجة لاحتكاك الهواء الناجم عن الدفق فوق الصوتي. وبموجب هذه الطرق، تقوم المضخات بإجبار دفق ثابت من الوقود الماص للحرارة على الاندفاع عبر ممرات تم إنشاؤها في داخل المحرك ومكونات الهيكل، غايتها سفط الحرارة التي يحتمل أن تسبب تلفاً للمحرك. ولهذه العملية فائدة رديفة تتمثل بتهيئة الوقود لعملية احتراق سريع داخل المحرك. وقد جرى تطبيق تقنية التبريد هذه بنجاح طوال عقود على الصواريخ التقليدية، واستخدم فيها الهيدروجين السائل مادة للتبريد. ويعتبر استخدام الوقود الهيدروكربوني في مثل هذا الوسط أكثر خطورة لأن الهيدروكربون المُجهد حرارياً يمكن أن يتفكك فوراً، ويتحول إلى فحم كوك صلب، وهذا يؤدي بدوره إلى انسداد ممرات التبريد. أما العيوب الأخرى فهي أن أنظمة التبريد الفاعل تستلزم وزناً وتعقيداً إضافيين، وأنها يجب أن تظل قاعلة: لأن أي نقصان في مادة تبريد الوقود سوف يؤدي إلى فشل بنيوي كارثي.

لذلك يعتبر التشغيل الناجح لمحرك سكرامجت بمثابة فعل توازني دقيق، يزيد من تعقيده أن أي شكل هندسي محدد لدفق الهواء لا يمكن أن يصل إلى حالته المثلى إلا عند تحقق مجموعة ملائمة واحدة من ظروف الطيران (السرعة، الارتفاع، وهلم جرا). وفي الحالة المثالية، يمكن للأبعاد الفيزيائية ولشكل مسار الدفق في محرك سكرامجت، أن تتكيف باستمرار كلما زادت سرعة المركبة وتغير ارتفاعها، لكن السطوح الداخلية المتحركة المقاومة للحرارة، والوصلات الميكانيكية ذات القدرات المماثلة، مازالت متخلفة عن المواد والبُنى المستعملة حالياً. فالحاجة إلى التحريك المستمر لسطوح المحرك الداخلية الشديدة السخونة، وإلى إحكام إغلاق الممرات لمنع تسرب غازات المحرك المرتفعة الحرارة، مازالت تكون عائقاً أمام تحقيق جميع القدرات الكامنة لدورة محرك سكرامجت.

### دراسة حالة

وعلى الرغم من العقبات التقنية المتأصلة في طبيعة محركات سكرامجت، فقد حقق الباحثون في الآونة الأخيرة نجاحات تبشر بإنجازات واعدة كثيرة في المستقبل. يتمثل أحد هذه النجاحات بتفعيل

A Case Study (+)



أن يؤدي إلى فشل كارثي. وهناك مشكلة أخرى مفادها أن عدم التوازن في التمدد الحراري بين المكونات الخزفية والمكونات المعدنية قد يشوه الأشكال الهندسية لمجاري الهواء ويترك محاولات التحكم في أداء محرك سكرامجت. وقد توصل المهندسون إلى تطوير مادة مقاومة للحرارة مكونة من الكربون ومركبات الكربون ومزودة بوصلات حرارية يمكنها أن تتغلب على هذه المشكلة. يُعتبر استخدام الوقود JP-7، في تشغيل محرك سكرامجت وتبريده، أساسيا لنجاح المركبة X-51A. وحتى الآن، كان يُنظر إلى الهيدروجين على أنه الوقود المفضل لمعظم برامج محركات سكرامجت وخلافا للهيدروجين، تمتاز معظم أنواع الوقود الهيدروكربوني بأنها أقل

يحدث فيها الاشتعال التلقائي للوقود. لذا فقد يتطلب المحرك وجود عنصر إضافي يساعد على عملية الاشتعال، كان يكون مادة مضافة كيميائية تخفف درجة حرارة الاشتعال التلقائي للوقود، أو جهازا قادرا على إشعال الوقود عن طريق توليد غاز ساخن جدا وحرقه داخل مزيج الهواء والوقود. أما عند بلوغ سرعات طيران تتجاوز 4 ماخ، فإن اشتعال اللهب وثباته يكونان أسهل بكثير، وذلك إلى حين الوصول إلى سرعات طيران عالية جدا تصبح فيها المدة القصيرة لبقاء الوقود في المحرك عائقا أمام استدامة عملية الاحتراق. وبحلول عام 2003، كان فريق «هايتك» طور مكونات المحرك، وأدخل فيه أنظمة جزئية تفي بمعظم متطلبات أهداف البرنامج

## إن مهمة حرق الوقود في محرك سكرامجت أشبه بإشعال عود ثقاب في عاصفة وإبقائه مشتعلا بطريقة ما.

تفاعلا وتحتوي على كمية أقل من الطاقة في وحدة الوزن، وبأن سعتها الحرارية المتدنية مناسبة لتبريد الهياكل الساخنة. غير أن الوقود الهيدروكربوني شائع الاستخدام في جميع تطبيقات سلاح الجو الأمريكي، ولذلك يحظى بوجود بنية تحتية شاملة لأغراض التوزيع والمناولة. إضافة إلى ذلك، فالوقود الهيدروكربوني يعبأ بطريقة أفضل، ويؤدي محتوى أكبر من الطاقة في وحدة الحجم، لذا فإن الحجم الذي يشغله على متن المركبة أقل من الحجم الذي تتطلبه كمية الهيدروجين التي تملك المحتوى ذاته من الطاقة.

وللتعويض عن التفاعلية المتدنية لوقود الهيدروكربون ومساوئ سعته الحرارية، يستفيد البرنامج هايتك من إمكانيات الوقود JP-7 في امتصاص الحرارة - أي من قدرته على تشتت الحرارة كيميائيا. فعندما تتلقى هذه الأنواع من الوقود الحرارة من محيطها في غياب الأكسجين ووجود حفاز كيميائي مناسب، تتفكك السلاسل الهوليميرية المعقدة فيها وتتحول إلى سلاسل بسيطة وقصيرة. وخلال هذه العملية، يمتص الوقود مقدارا من الحرارة يعادل خمسة أضعاف سعته الحرارية الكامنة - أي الحرارة التي يمتصها السائل بمجرد تسخينه. وإضافة إلى ذلك، يتحول الوقود، بعد تعرضه لتسخين ماص للحرارة، إلى غاز ساخن يحتوي على كمية من الطاقة تزيد بنسبة 10 في المئة على الطاقة الكيميائية للوقود السائل الذي لم يتعرض للتسخين. وفي النهاية، تكون الهيدروكربونات الناتجة ذات الوزن الجزيئي المنخفض أكثر تفاعلا من جزيئات الوقود الأصلي، وهذا يسهل عملية احتراقها خلال الوقت القصير الذي يكون فيه الوقود موجودا داخل محرك سكرامجت.

وكان المهندسون قد أنتجوا قبل ذلك محركا ذا شكل هندسي ثابت وحجم كاف لتسيير مركبة شبيهة بالصاروخ (يمكن أن تبدأ فيها عملية احتراق وقود هيدروكربوني، مثل الوقود JP-7) بسرعة قدرها 4.5 ماخ، ثم تتسارع بعد ذلك لتصل إلى سرعة قدرها 7 ماخ. وهناك تقانات أخرى قيد الإعداد، متعلقة بالتبريد الفاعل والهياكل المقاومة للحرارة، تسمح للمحرك بالحفاظ على توازنه الحراري مادام الوقود موجودا في المركبة. وفي عام 2009 سوف يجري تعزيز مركبة الطيران الحر X-51A بصاروخ يمكنها من بلوغ سرعات هائلة قبل أن تنطلق إلى

الأصلي أو تتخطاها. بيد أنه حتى بعد الاختبارات الأرضية الموسعة للمحرك، ظلت بعض الارتبايات الأساسية المتعلقة بالتطوير قائمة. ويُعد تقصي هذه التساؤلات المتبقية، المرتبطة بمجملها بالمحافظة على الأداء أثناء الظروف الانتقالية - كتغير السرعة والارتفاع وإعدادات الخانق - صعبا جدا في الأنفاق الهوائية، ويستحسن أن يجري التصدي لها في عمليات الطيران الاختبارية.

لهذا السبب، سوف تقوم مركبة البيان العملي لمحرك سكرامجت (SED) Seramjet Engine Demonstrator التابعة لسلاح الجو الأمريكي، والمعروفة حاليا باسم X-51A، بنقل بعض أنظمة محرك «هايتك» إلى الفضاء عام 2009 [انظر الشكل في الصفحة المقابلة] وهذا البرنامج هو متابعة لعملية التقييم أثناء الطيران للتقانة، التي مازال العمل جاريا لتحسينها في البرنامج هايتك. وقد استطاع مهندسو «هايتك»، بوساطة اختبارات جرت على الأرض وتحليل حاسوبي موسع، أن يبتكروا محركا من نوع سكرامجت، يتميز بوزن مناسب للطيران وتبريد فاعل، يمكن اختباره ضمن البرنامج SED.

عندما وجد فريق المهندسين البرنامج SED نفسه عاجزا عن تغيير الشكل الداخلي للمحرك أثناء الطيران، بغية تعديل الأداء ليتلاءم مع السرعات والارتفاعات السريعة التغير، وقع اختياره على بناء مسار دفق ذي شكل هندسي ثابت يمكن اعتباره حلا وسطا بين التسارع المناسب في الحد الأدنى لنطاق السرعة (بين 4.5 و 7 ماخ) وبين الأداء الفعال للطيران بأعلى سرعة له التي مقدارها 7 ماخ. وقد تبين أن معالجة توزيع الوقود داخل المحرك هي الوسيلة الأساسية للتحكم في المحرك - أي في قوة دفعه ومعدل تسارعه والحفاظ على عمله المستقر.

لقد صنع هذا المحرك أساسا من مادة الفولاذ، التي يمكن تبريدها بفعالية بوساطة الدفق الداخلي للوقود. إضافة إلى ذلك، فقد استعاض عن الفولاذ بمكونات خزفية مقاومة للحرارة في بعض الحافات الأمامية للمحرك - أي المناطق الواقعة في مقدمته، التي تتلقى قوة الصدم المباشر لدفق الهواء الساخن - التي تكون حادة جدا لدرجة لا تسمح لها باحتواء ممرات مادة التبريد. هذا وإن وصل الأجزاء المبردة بالأجزاء غير المبردة بطريقة موثوقة عملية تنطوي على صعوبة كبيرة، لكنها شديدة الأهمية. ومن الواضح أن أي عطل بنيوي سريع وشديد (قبل أن يبلغ الصاروخ هدفه)، يمكن

tongue-and-groove joints (1)

النتيجة في الصفحة 69



## حوسبة بالعقد الكمومية<sup>(\*)</sup>

آلة تعتمد على جسيمات غريبة، تسمى الأنيونات *anyons*، وتمثل الحساب كمجموعة من الضفائر في الزمكان، يمكن أن تكون طريقاً مختصراً إلى الحوسبة الكمومية العملية.

<P.G. كولنز>

تعد الحواسيب الكمومية بتنفيذ حسابات يُعتقد أنها مستحيلة بواسطة الحواسيب العادية. وبعض هذه الحسابات على قدر كبير من الأهمية في عالم الواقع. فعلى سبيل المثال، بعض طرائق التعمية (التشفير) الواسعة الاستخدام يمكن أن تُكسر بوجود حاسوب قادر على تحليل عدد كبير إلى عوامله الأولية خلال مدة معقولة. وفي الحقيقة، إن جميع الطرائق المستخدمة لتعمية البيانات الشديدة الحساسية عرضة للكسر بخوارزمية كمومية أو بأخرى.

تُرد الطاقة الإضافية التي يتمتع بها الحاسوب الكمومي إلى أنه يعالج معلومات ممثلة ككيوبتات *qubits*، أو البتات الكمومية، بدلا من البتات. إن البتة التقليدية العادية يمكن أن تكون إما 0 أو 1، وبنى الشبكات الميكروية الشائعة تعزز هذا الانقسام بين هاتين القيمتين تعزيزاً صارماً. لكن على النقيض من ذلك، يمكن للكيوبت أن تكون فيما يسمى حالة تراكب *superposition*، وهذه تقتضي وجود نسب *proportions* من الـ 0 والـ 1 متعايشة معا يمكن للمرء النظر إلى حالات الكيوبت الممكنة على أنها نقاط على كرة، حيث يمثل القطب الشمالي الـ 1 التقليدي، ويمثل القطب الجنوبي الـ 0 التقليدي، وتمثل جميع النقاط بينهما جميع التراكبات الممكنة للـ 0 والـ 1 [انظر: «قواعد لعالم كمومي معقد» **العلوم**، العددان 7/6 (2003)، ص 70]. إن حرية الكيوبتات في التجوال في كامل الكرة تساعد على إعطاء الحواسيب الكمومية مقدراتها الفريدة.

لكن لسوء الطالع يبدو أن بناء الحواسيب الكمومية شديد الصعوبة. ويعبر عادة عن الكيوبتات باعتبارها خواص كمومية معينة لجسيمات مأسورة *trapped particles*، من قبيل الأيونات (الشوارد) الذرية والإلكترونات المستقلة. لكن حالات تراكب تش الجسيمات هي هشة جداً، إذ يمكن لأضال التأثيرات المشوشة مع البيئة المحيطة، التي تشمل جميع المادة التي يتكون منها الحاسوب نفسه، أن تعطيها. فإذا لم تُعزل الكيوبتات عن محيطها بعناية، فإن مثل هذه الاضطرابات سوف تدخل أخطاء في الحوسبة.

لذا، تُركّز معظم طرائق تصميم الحاسوب الكمومي على إيجاد سبل لجعل تأثيرات الكيوبتات مع المحيط أصغر. ويعلم الباحثون أنه إذا كان من الممكن تخفيض معدل الخطأ إلى حد



يضفر خطوط العالم (مسارات) *world lines* لجسيمات خاصة، يمكن تنفيذ حوسبة كمومية مستحيلة الإجراء بأي حاسوب عادي (تقليدي). إن تلك الجسيمات تعيش في سائل يسمى غاز إلكترونات ثنائي الأبعاد.



## لأول وهلة، لا يبدو الحاسوب الكمومي الطوبولوجي كثيرا كحاسوب.

واحد في كل 10 000 خطوة، فإن إجراءات تصحيح الخطأ يمكن أن تُستخدم للتعويض عن عطب الكيوبتات الفردية. إن بناء آلة عاملة، تحوي عددا كبيرا من الكيوبتات المعزولة عزلا جيدا للحصول على معدل الخطأ المنخفض هذا، مهمة مُروَّعة جعلت الفيزيائيين أبعد ما يكونون عن إنجازها.

لكن بعض الباحثين يستقصون نهجا مختلفا كلياً لبناء حاسوب كمومي. في نهجهم ذلك، تعتمد الحالات الكمومية المرهفة على ما يُعرف بالخواص الطوبولوجية للنظم الفيزيائية. إن الطوبولوجيا هي الدراسة الرياضياتية للخواص التي لا تتغير حينما يتشوه الجسم تشوهاً ناعماً، بأفعال كالمطّ والرقّ والحني، لا القطع والوصل، وهي تشمل مواضيع من مثل نظرية العقدة knot theory، والاضطرابات الضئيلة لا تغير الخواص الطوبولوجية. فالحلقة المغلقة، على سبيل المثال، المكوَّنة من خيط يحوي عقدة مربوطة فيه، تختلف طوبولوجيا عن حلقة مغلقة ليس فيها عقدة [انظر الإطار في الصفحة 64]، إن الطريقة الوحيدة لتحويل الحلقة المغلقة إلى حلقة مغلقة مع عقدة هي قطع الخيط، وعقد العقدة ثم إعادة لصق طرفي الخيط معاً. وبالمثل، فإن الطريقة الوحيدة لتحويل كيوبتة طوبولوجية إلى حالة مختلفة، هي تعريضها لإجراء عنيف كمثّل ذلك الإجراء. فالوكزات الضئيلة التي تسببها البيئة المحيطة لا تفلح في ذلك.

لأول وهلة، لا يبدو الحاسوب الكمومي

الطوبولوجي كالحاسوب على الإطلاق. فهو يجري حساباته على خيوط مضفورة، لكن هذه الخيوط ليست خيوطاً مادية بالمعنى التقليدي، بل هي ما يصفها الفيزيائيون بأنها خطوط العالم world lines، وهي تمثيل للجسيمات حينما تتحرك عبر المكان والزمان (تخيل أن طول واحد من هذه الخيوط يمثل حركة الجسيم عبر الزمن، وأن ثخانتها تمثل أبعاد الجسيم المادية). حتى إن الجسيمات المستخدمة ليست كالألكترونات والبروتونات التي قد تخطر ببال المرء أول الأمر، بل هي أشباه جسيمات quasiparticles، أي تهيجات في منظومة إلكترونية ثنائية الأبعاد تسلك سلوكاً مشابهاً كثيراً لسلوك الجسيمات والجسيمات المضادة في فيزياء الطاقات العالية. ولزبد من التعقيد، فإن أشباه الجسيمات تلك هي من نوع خاص يسمى الأنيونات anyons، التي تمتلك الخواص الرياضياتية المطلوبة.

وهاك ما يمكن لحوسبة ما أن تكون: ولّد، أولاً، زوجاً من الأنيونات وضَعهما على خط جنباً إلى جنب [انظر الإطار في الصفحة 65]. إن كل زوج من الأنيونات يبدو كجسيم وجسيم مضاد له، تولّد من طاقة بحتة. بعد ذلك حرّك أزواج الأنيونات المتجاورة، بعضاً حول بعض، في سلسلة من الخطوات المحددة بعناية. يُشكّل خط عالم كل أنيون خيطاً، وتؤدي حركات الأنيونات، لدى مبادلة مواضعها بهذه الطريقة، إلى ضمير جميع الخيوط. إن الحوسبة الكمومية متضمنة في

الضغيرة الخاصة المشكلة بهذا النحو وتتحدد الحالات النهائية للأنيونات، والتي تجسّد نتيجة الحوسبة، بالضغيرة لا تأتي تأثر إلكتروني أو مغنطيسي مشوّش. ونظراً إلى أن الضغيرة طوبولوجية - أي إن وكز الخيوط قليلاً هنا وهناك لا يغيّر الضغيرة - فإنها تكون محمية بطبيعتها من الاضطرابات الخارجية. لقد اقترح فكرة استخدام الأنيونات لإجراء الحوسبة بهذه الطريقة في عام 1997 [A. Y. Kitaev] وهو يعمل حالياً في الشركة مايكروسوفت.

ألقي «M. H. فريدمان» (وهو يعمل حالياً لدى الشركة مايكروسوفت) محاضرات في جامعة هارفرد في خريف عام 1988 حول إمكان استخدام الطوبولوجيا الكمومية في الحوسبة. إن هذه الأفكار، التي نُشرت في مقالة بحثية في عام 1998، بُنيت على اكتشاف أن مقادير رياضياتية معينة، تُعرف بـ «لامتغيرات العقدة» knot invariants، كانت على علاقة بالفيزياء الكمومية لسطح شائبي الأبعاد يتطور في الزمن. فإذا أمكن بناء نموذج لمثل هذه المنظومة الفيزيائية وإجراء القياس الملائم، فإن لامتغيرات العقد يمكن أن تُحسب تلقائياً تقريباً عوضاً عن إجراء الحسابات الطويلة بحاسوب تقليدي. ويمكن أن تكون لمساائل لها صعوبة مماثلة، لكنها ذات أهمية أكثر واقعية، سبب حساب مختصرة مماثلة.

ومع أن هذا يبدو تنظيراً غريباً وبعيداً عن الواقع، فقد وضعت تجارب حديثة، في حقل يُعرف بفيزياء «هول» fractional quantum Hall physics، طريقة الأنيونات على أرض صلبة. واقترح مزيد من التجارب لتحقيق خطوات أولية في الحوسبة الكمومية الطوبولوجية

### الأنيونات<sup>(\*)</sup>

وفقاً لما ذكر آنفاً، يضفر الحاسوب الكمومي الطوبولوجي خطوط العالم بمبادلة مواضع الجسيمات. إن كيفية تصرف

(\*) Overview/ Quantum Braids

(\*\*) Anyons

(١) تأتي صفة الكسرية من حقيقة أن شحنة الجسيمات الكمومية تساوي كسراً من شحنة الإلكترون.

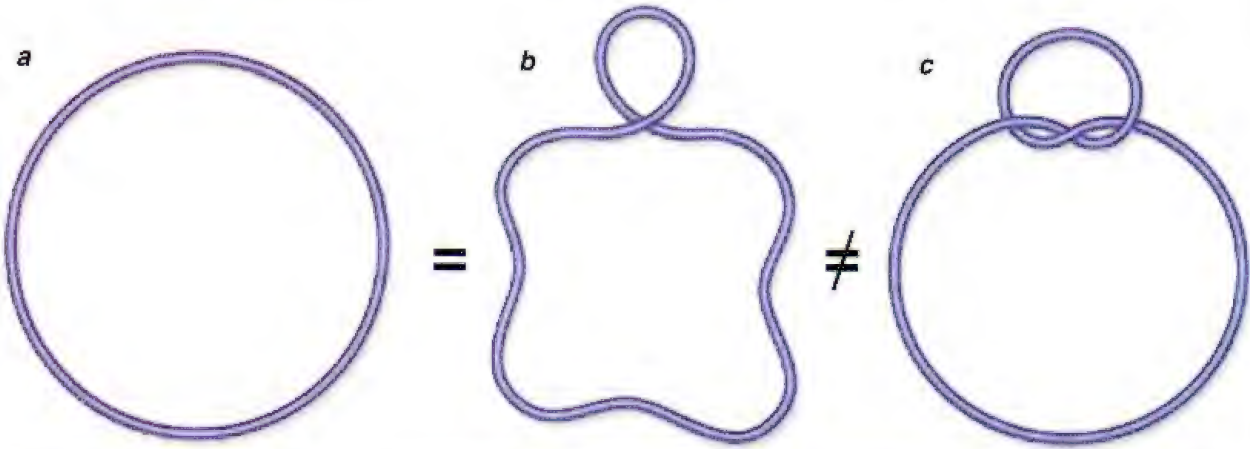
## نظرة إجمالية/ الضفائر الكمومية<sup>(\*)</sup>

- تُعد الحواسيب الكمومية بأن تتجاوز قدراتها كثيراً قدرات الحواسيب التقليدية، لكن كي تصبح عاملة من حيث المبدأ، يجب أن تكون معدلات الأخطاء فيها منخفضة جداً، وتحقيق معدلات الخطأ المنخفضة المطلوبة بوساطة التصميم التقليدية بعيد عن متناول الإمكانيات التقانية الحالية.
- أما التصميم البديل فهو ما يُسمى الحاسوب الكمومي الطوبولوجي الذي يُستخدم نظاماً فيزيائياً مختلفاً جذرياً لإجراء الحوسبة الكمومية. إن الخواص الطوبولوجية لا تتغير بالاضطرابات الطفيفة، وهذا ما يؤدي إلى مناعة ذاتية من أخطاء كتلك التي تسببها التأثيرات المشوشة مع البيئة المحيطة.
- يمكن للحوسبة الكمومية الطوبولوجية أن تستخدم تهيجات مفترضة نظرياً، تسمى أنيونات، وهي بنى شبه جسيمية particlelike غريبة ممكنة الوجود في عالم ثنائي الأبعاد. وقد أشارت التجارب حديثاً إلى أن الأنيونات توجد في بنى شبه موصلة مستوية خاصة، تُبرّد إلى درجة حرارة قريبة من الصفر المطلق وتُغمّر في حقول مغنطيسية شديدة.



## الطوبولوجيا والعقد<sup>(\*)</sup>

لا تتغير طوبولوجيا الحلقة المغلقة (a) closed loop إذا دُفع الخيط ليُكوّن شكلاً آخر (b) مختلفاً عن ذاك ذي الحلقة المغلقة الذي يحتوي عقدة مربوطة فيه (c)، إذ لا يمكن تشكيل العقدة بمجرد تحريك الخيط. لفعل ذلك، لا بد من قطع الخيط وربط العقدة، ثم إعادة وصل الطرفين. لذا، تكون طوبولوجيا الحلقة غير حساسة للاضطرابات التي تحرك الخيط من مكان إلى آخر.



القيمتين فهي أعداد عقدية. على سبيل المثال، الزاوية 90 درجة تقابل  $i$ ، أي الجذر التربيعي لـ (-1). وكما في حالة العامل (-1)، فإن ضرب دالة الموجة بطور لا يؤثر أبداً في الخصائص المقاسة للجسيم ذاته، لأن المهم في هذه الخصائص هو مطال اهتزاز الموجة فقط. ومع ذلك، فإن الطور (أي العدد العقدي) يمكن أن يغير كيفية تداخل موجتين عقديتين.

تسمى الجسيمات، التي تأخذ طورا عقدياً حين مبادلة مواضعها، أنيونات لأنه يمكن لهذا الطور أن يأخذ أي قيمة عقدية، لا إحدى القيمتين  $+1$  أو  $-1$  فقط. أما الجسيمات التي تنتمي إلى جنس species معين، فتأخذ دائماً الطور نفسه.

### إلكترونات في أرض مسطحة<sup>(\*\*)</sup>

توجد الأنيونات في عالم ثنائي الأبعاد فقط. فكيف نستطيع توليد أزواج منها لاستخدامها في الحوسبة الطوبولوجية ونحن نعيش في ثلاثة أبعاد؟ إن الجواب عن هذا السؤال يكمن في مملكة الأرض المسطحة لأشباه الجسيمات. يمكن صنع شريحتين، من شبه موصل مصنوع من زرنيخ الغاليوم، بعناية كي تحتضن هاتان الشريحتان «غزاً»

(\*) Topology And Knots

(\*\*) Electrons in Flatland، و Flatland هنا إشارة إلى الرواية Flatland: A romance of many dimensions، للكاتب Edwin A. Abbott (1838 - 1926)، وفيها يتخيل عوالم أحادية وثلاثية وستاسية الأبعاد. (التحرير

للإلكترونين التداخل بها مع الإلكترونات الأخرى. يحصل التداخل interference عندما تجمع موجتان معا. وعندما تتداخل موجتان، يكون لمجموعهما مطال كبير حيثما تقع قمم إحداهما على خط مستقيم مع قمم الأخرى («تداخل بناء» constructive interference)، ومطال صغير حيثما تقع قمم الأولى على خط مستقيم مع قيعان الأخرى («تداخل هدام» destructive interference). وضرب إحدى الموجات بـ (-1) يجعل القمم قيعانا، ولذا يبدل التداخل البناء، بقعة مضيئة، بتداخل هدام، بقعة مظلمة.

ليست الإلكترونات وحدها هي التي تتأثر بالعامل (-1) بهذه الطريقة، بل البروتونات والنيوترونات أيضاً، وعموماً أي جسيم من الفئة التي تدعى فرميونات fermions. أما البوزونات، وهي فئة الجسيمات الرئيسية الأخرى، فتمتلك دوال موجة لا تتغير حينما يتبادل جسيमान موضعيهما. لذا يمكنك القول إن دوال موجاتها تُضرب بعامل يساوي (+1).

تقتضي أسباب رياضية عميقة أن الجسيمات الكمومية في الأبعاد الثلاثة يجب أن تكون إما فرميونات أو بوزونات. أما في بعدين اثنين، فثمة إمكانية أخرى: يمكن للعامل أن يكون طورا عقدياً complex phase. ويمكن تخيل الطور العقدي على شكل زاوية. فالزاوية التي تساوي 0 تقابل 1، والزاوية التي تساوي 180 درجة تقابل -1. أما الزوايا بين هاتين

الجسيمات حين مبادلة مواضعها هي واحدة من أوجه الاختلاف الجوهرية الكثيرة بين الفيزياء الكمومية والفيزياء التقليدية. ففي الفيزياء التقليدية، إذا كان لديك إلكترونان في الموضعين a و b، وقمت بمبادلة موضعيهما، فإن الحالة النهائية تماثل الحالة الابتدائية؛ إذ لما كان من غير الممكن التمييز بين الإلكترونين، فإنه لا يمكن التمييز أيضاً بين الحالتين الابتدائية والنهائية. أما في الفيزياء الكمومية، فالأمر ليس بهذه البساطة.

ينجم الاختلاف عن أن الميكانيك الكمومي يصف حالة الجسيم بمقدار يسمى دالة (تابع) الموجة wave function، أي موجة في فضاء يتضمن جميع خواص الجسيم، مثل احتمال العثور عليه في المواضع المختلفة، واحتمال قياسه عند سرعات مختلفة، وهلم جرا. وعلى سبيل المثال، يكون العثور على الجسيم في منطقة معينة أعلى احتمالاً إذا كان لدالة الموجة في هذه المنطقة مطال amplitude أكبر.

يتعين زوج من الإلكترونات بدالة موجة مشتركة، وحين مبادلة موضعي الإلكترونين، تكون دالة الموجة المشتركة الناتجة هي دالة الموجة المشتركة الأصلية مضروبة بـ (-1). وهذا يجعل قمم peaks الموجة قيعانا troughs، وقيعانها قمما، لكنه لا يؤثر في مطال الاهتزاز، ولا يغير أي مقدار قابل للقياس يخص الإلكترونين المعنيين بالذات. لكن ما يتغير فعلاً هو الكيفية التي يمكن



## طريقة عمل الحوسبة الكمومية الطوبولوجية<sup>(\*)</sup>

### الضفر

فقط بحركتين أساسيتين في المستوي، هما مبادلة المواضع باتجاه عقارب الساعة، ومبادلتهما في الاتجاه المعاكس، يمكن توليد جميع طرائق الضفر الممكنة لخطوط العالم (للمسارات عبر الزمكان) لمجموعة من الأنيونات.

مبادلة مواضع باتجاه دوران عقارب الساعة

الضفيرة الناتجة

مبادلة مواضع بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة

الضفيرة الناتجة



=



الزمن →



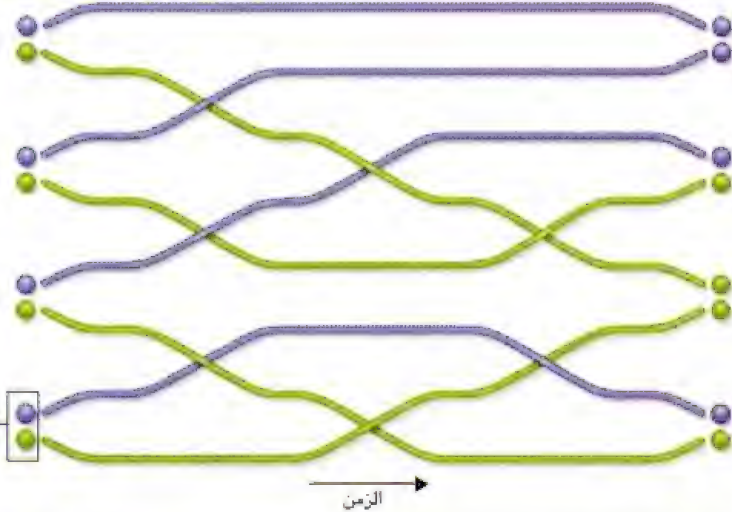
=



الزمن →

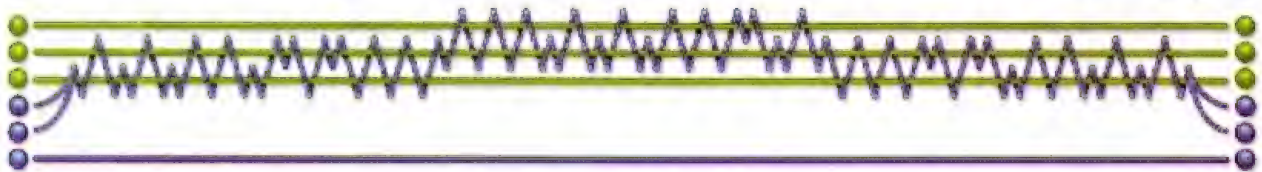
### حوسبة

تُولد أولاً أزواج من الأنيونات، وتُصَفُّ في سطر لتمثل كيوبتات الحوسبة، أو بتات الحوسبة الكمومية. وتُحَرَّك الأنيونات من أمكنتها، بمبادلة مواضع الأنيونات المتجاورة وفقاً لسلسلة خطوات معينة. إن هذه الحركات تُقابل عمليات تُجرى على الكيوبتات. وفي النهاية، تُضمَّ أزواج الأنيونات المتجاورة معاً، ويُقاس لتكوين مُخرَج output الحوسبة. ويعتمد المُخرَج على طوبولوجيا الضفر المحدد الناتج عن تلك العمليات. إن الاضطرابات الطفيفة في الأنيونات لا تغير الطوبولوجيا، وهذا ما يجعل الحوسبة منيعة على أخطاء المصادر العادية.



الزمن →

### بناء بوابة منطقية



تُصنع بوابة منطقية، تسمى بوابة النفث المتحكم فيها CNOT، بعملية الضفر المعقدة هذه لسلسلة أنيونات. تأخذ البوابة CNOT كيوبتين في مدخلها وتنتج كيوبتين في مخرجها. وقد مُكِّلت هذه الكيوبتات بثلاثيَّين (خضراء/زرقاء) مما يسمى أنيونات فيبوناتشي Fibonacci. إن أسلوب الضفر الخاص هذا، أي ترك ثلاثية واحدة في مكانها وتحريك أنيونين من الثلاثية الثانية حول أنيونات الأولى، بسط الحسابات المستخدمة في تصميم البوابة. وأسلوب الضفر هذا يُنتج بوابة CNOT دقتها تساوي تقريباً  $10^{-3}$

المغناطيسية magnetic flux معها كما لو كانت السائلة جزءاً لا يتجزأ من الجسم. وفي عام 2005، ادعى «J. K. K. Goldman» و «F. E. Kamienko»، و «W. Zuo» [من جامعة ستوني بروك] أنهم حصلوا على تأكيد تجريبي مباشر لما مفاده أن أشباه الجسيمات التي تحدث في حالة «هول» الكمومية الكسرية هي أنيونات، وهذه

How Topological Quantum Computing Works (\*)  
two-dimensional electron gaz (1)

عند درجات حرارة منخفضة جداً، وذلك بسبب الخواص الكمومية الاستثنائية التي تظهر في هذه الظروف.

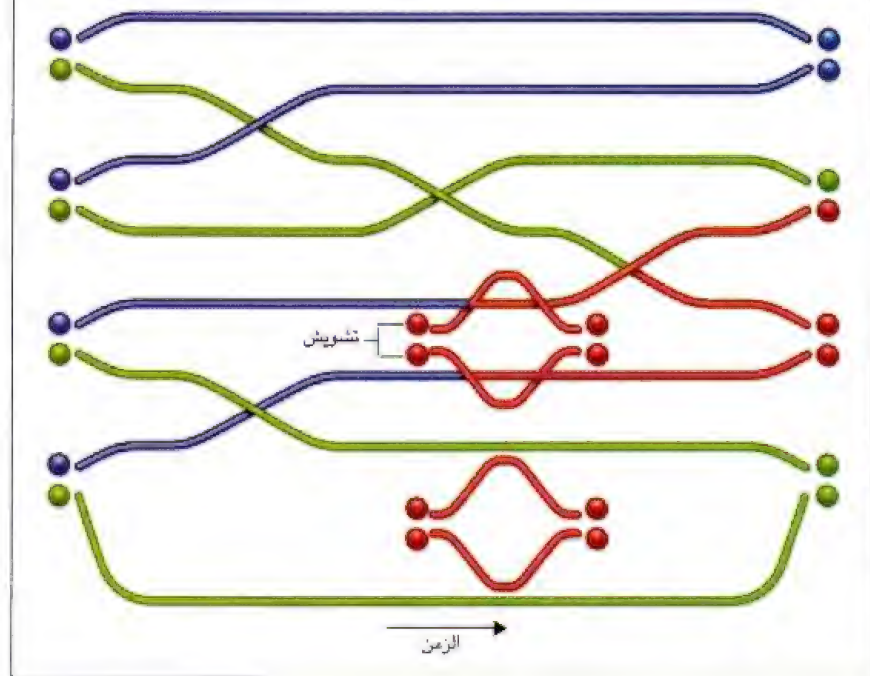
على سبيل المثال، في مفعول «هول» الكمومي الكسري، تسلك التهيُّجات في غاز الإلكترونات سلوك جسيمات ذات شحنة تساوي جزءاً من شحنة الإلكترون. وتحمل تهيجات أخرى وحدات من السائلة

من الإلكترونات في السطح الفاصل بينهما، تتحرك الإلكترونات بحرية في بُعدي السطح اللانتهين، لكنها تُمنع من الحركة في البعد الثالث، لأن ذلك يُخرجها من السطح. وقد درس الفيزيائيون باستفاضة نظم الإلكترونات هذه، التي تسمى غازات الإلكترونات الثنائية الأبعاد<sup>(\*)</sup>، وخاصة حينما تُغمَر في حقول مغناطيسية عرضانية قوية



## منع الأخطاء العشوائية<sup>(\*)</sup>

سوف تحصل أخطاء في الحوسبة الطوبولوجية إذا ولدت التفاوتات الحرارية أنيونين مشوشين يُجدلان مع ضفيرة الحوسبة قبل أن يتفانوا ذاتيا. وهذه المشوشات سوف تُحَرَّب (الخطوط الحمراء) الحوسبة، لكن احتمال هذا التداخل يتناقص أسيا مع المسافة التي تقطعها الأنيونات، لذا يمكن جعل معدل الخطأ أصغريا بإبقاء أنيونات الحوسبة بعيدة بعضها عن بعض بعدا كافيا (الزوج السفلي)



اقترح إحداهما «فريدمان» مع «S.D. سارما» [من جامعة ماريلاند] و «C. ناياك» [من الشركة مايكروسوفت]، مع تنقيحات مهمة اقترحها «A. شترن» [من معهد وايزمان] و «B. هالبرين» [من جامعة هارفرد]. واقترح الثانية «كيثايف» و «P. بوندرسون» [من معهد كاليفورنيا للتقانة] و «K. شتنكل» [من جامعة كاليفورنيا برفرسايد].

### صفائر وبوابات<sup>(\*\*)</sup>

إذا حصلت على أنيونات لاتبديلية، فإنك تستطيع توليد تمثيل مادي لما يسمى زمرة الضفيرة the braid group. إن هذه البنية الرياضياتية تصف جميع الطرائق التي يمكن بها ضم صف معين من الخيوط معا. ويمكن تشكيل أي ضفيرة من سلسلة من العمليات الأولية التي يُحرَّك فيها خيطان متجاوران باتجاه دوران عقارب الساعة أو بعكسه. إن كل سلسلة ممكنة لمعالجة الأنيونات تقابل ضفيرة، والعكس صحيح. وتقابل كل ضفيرة أيضا مصفوفة شديدة التعقيد هي نتيجة ضم جميع المصفوفات الفردية لكل مبادلة أنيونية.

والآن، صار بين أيدينا جميع العناصر اللازمة لرؤية كيف أن هذه الصفائر تقابل حوسبة كمومية. في الحاسوب التقليدي، تمثل حالة الحاسوب بحالة جميع بتاته مجتمعة، أي بسلسلة الأصفار والآحاد في سجله. وبالمشابهة، يمثل الحاسوب الكمومي بحالة كل كيوبتاته مجتمعة. وفي الحاسوب الكمومي الطوبولوجي، يمكن تمثيل الكيوبتات بمجموعات من الأنيونات.

في الحاسوب الكمومي، توصف سيرورة الانتقال من الحالة الابتدائية لجميع الكيوبتات إلى الحالة النهائية بمصفوفة تُضرب بدالة الموجة المشتركة للكيوبتات جميعا. إن وجه التشابه، بين ذلك وبين ما يحصل في حاسوب كمومي طوبولوجي، واضح: المصفوفة هنا هي تلك المقترنة بالصفيرة المحددة المقابلة لسلسلة معالجة الأنيونات. بهذا نكون قد بينا أن العمليات المُجرَّاة على الأنيونات تُنتج حوسبة كمومية.

وثمة سمة مهمة أخرى يجب إثباتها: هل يستطيع حاسوبنا الكمومي الطوبولوجي إجراء أي حوسبة يستطيع إجراءها حاسوب كمومي تقليدي؟ في عام 2002، أثبت «فريدمان» وزملاؤه أن الحاسوب الكمومي الطوبولوجي

مبادلة مواضع الجسيمات هو أمر مهم. تخيل أن لديك ثلاثة أنيونات متماثلة مصطفة على سطر في المواضع a و b و c. بادئُ أولا موضعي الأنيونين في الموضعين a و b، ثم بادئُ موضعي الأنيونين الموجودين الآن في b و c. إن النتيجة ستكون الدالة الأصلية للموجة معدلة بعامل ما. افترض أنه جرت مبادلة موضعي الأنيونين اللذين في b و c أولا، ثم جرت مبادلة الموضعين a و b، فإذا كانت النتيجة هي دالة الموجة مضروبة بنفس العامل الذي كان من قبل المبادلة، وُصفت الأنيونات بأنها تبديلية. أما إذا اختلف العاملان بسبب اختلاف ترتيب المبادلة، كانت الأنيونات لاتبديلية (تنشأ خاصية اللاتبديلية لأن العامل الذي تُضرب به دالة موجة هذه الأنيونات يتكوّن من مصفوفة أعداد، ونتيجة ضرب مصفوفتين تعتمد على ترتيبهما).

لقد تضمنت التجربة التي أجراها فريق «غولدمان» أنيونات تبديلية. ومع ذلك، يوجد لدى النظريين مبررات قوية للاعتقاد بأن أشباه جسيمات معينة، من أشباه جسيمات هول الكمومية الكسرية، هي لاتبديلية حقا. وقد اقترحت تجربتان للإجابة عن هذا السؤال.

خطوة مهمة أولى في النهج الطوبولوجي للحوسبة الكمومية. لكن بعض الباحثين مازالوا يستقصون سبلا مستقلة أخرى لإثبات طبيعة أشباه الجسيمات الأنيونية، لأن مفاعيل لاكمومية معينة يمكن أن تؤدي، من حيث الفكرة، إلى النتائج التي حصل عليها «غولدمان» وزملاؤه.

في البعدين الاثنين، ثمة أمر جديد مهم يبرز حين مبادلة موضعي الجسيمين: هل يتّبع الجسيمان مسارين باتجاه دوران عقارب الساعة، أو بعكس ذلك الاتجاه، حين مبادلة موضعيهما؟ إن الطور الذي تأخذه دالة الموجة يعتمد على تلك الخاصية. فالمساران البديلان متميزان طوبولوجيا، لأن القائم بالتجربة لا يستطيع باستمرار تغيير المسارين اللذين لهما اتجاه دوران عقارب الساعة ليصبحا بعكس ذلك الاتجاه من دون جعل المسارين يتقاطعان والجسيمين يتصادمان في مكان ما.

يتطلب بناء حاسوب كمومي طوبولوجي تعقيدا إضافيا آخر: يجب أن تتصف الأنيونات بصفة تُدعى اللاتبديلية nonabelian التي تُعني أن ترتيب تسلسل

Preventing Random Errors (\*)  
Braids and Gates (\*\*)



### كاشف أنيونوني

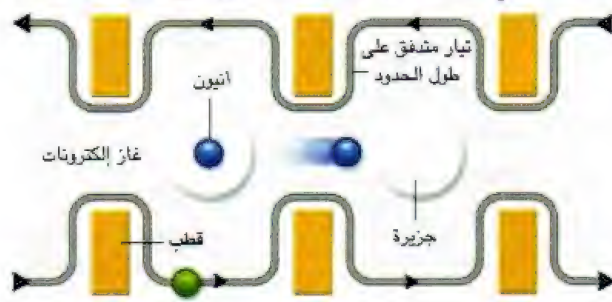
استخدم «V. كولدمان» وزملاؤه التجهيز المبنية في هذا الشكل لبيان أن أشباه جسيمات معينة (تهيجات في حالة «هول» الكمومية) تسلك سلوك الأنيونات. لقد بُرِّت التجهيز إلى الدرجة 10 ميلي كلفن ووضعت في حقل مغناطيسي شديد. وقد تشكل غاز إلكترونات ثنائي الأبعاد حول الأقطاب الأربعة، مع نوعين مختلفين من أشباه الجسيمات وجدت في المنطقتين الصفراء والخضراء. وأكدت خصائص التيار المتدفق على طول الحدود أن أشباه الجسيمات التي هي في الجزيرة الصفراء كانت أنيونونية.



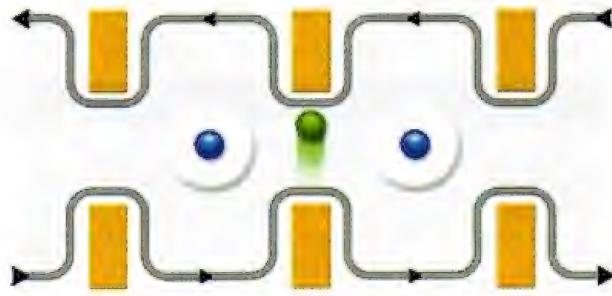
### بوابة النفى

إن بوابة النفى الأنيونية المقترحة هذه تقوم على حالة «هول» الكمومية الكسرية التي تتضمن أنيونات تمتلك ربع شحنة إلكترون. وتُحَرِّض الأقطاب جزيرتين يمكن أن تُؤسَّر فيهما الأنيونات. ويتدفق التيار على طول الحدود، لكنه، بتوافر الظروف الملائمة، يستطيع التدفق في نفق عبر الفجوات الضيقة بين الأقطاب المتقابلة.

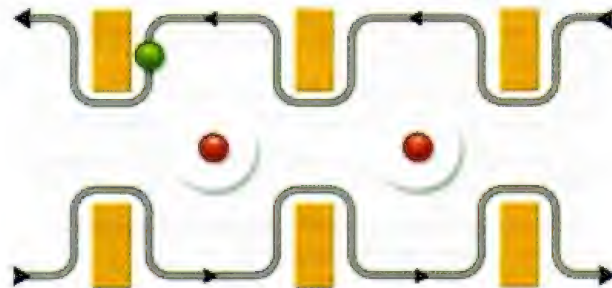
1 حَضَّر الحالة الابتدائية للبوابة بوضع أنيونين (الأزرق) في جزيرة، ثم طَبَّق جهداً كهربائياً لنقل أنيون واحد إلى الجزيرة الأخرى. يمثل هذا الزوج من الأنيونات الكيوبتة في حالتها الابتدائية التي يمكن تحديدها بقياس التيار المتدفق على طول الحدود المجاورة.



2 لقلب حالة الكيوبتة (عملية النفى)، طَبَّق جهداً كهربائياً لجعل أنيون واحد من الحدود (الأخضر) يعبر التجهيز بقطع نفق.



3 إن عبور هذا الأنيون يغير علاقة الطور بين الأنيونين، وهذا ما يجعل قيمة الكيوبتة تنقلب إلى الحالة المعاكسة (الأحمر).



يستطيع فعلاً محاكاة أي حوسبة يجريها حاسوب كمومي عادي، مع نقيصه واحدة وهي أن المحاكاة تقريبية. لكن إذا حُدِّت درجة الدقة المرغوبة، كأن تكون 1 من  $10^4$  مثلاً، فإنه يمكن إيجاد صغيرة تحاكي الحوسبة المطلوبة بتلك الدقة. وكلما ازدادت الدقة المطلوبة، ازداد عدد الجدلات في الصغيرة. ومن حسن الطالع أن عدد الجدلات اللازمة يتزايد ببطء شديد؛ لذا فليس من العسير جداً الحصول على دقة عالية جداً. لكن برهانهم لا يشير إلى كيفية تحديد الصغيرة الفعلية التي تقابل حوسبة ما، لأن ذلك يعتمد على التصميم الخاص بالحاسوب الكمومي الطوبولوجي، وخصوصاً، على جنس الأنيونات المستخدمة وعلاقتها بالكيوبتات الأساسية.

في عام 2005، قام «E.N. بونسستيل» وزملاؤه [من جامعة ولاية فلوريدا] بمعالجة مسألة إيجاد ضغائر خاصة بإجراء حوسبات معينة. وقد بين الفريق، على نحو جلي، كيفية بناء ما يُسمى بوابة النفى «NOT» المتحكم فيها (أو بوابة CNOT)، بدقة جزأين من  $10^4$  جزءاً، وذلك بضفر ستة أنيونات. تأخذ البوابة CNOT مُدْخَلَيْن: بَتَّةً تُحَكَّم وبَتَّةً متحكم فيها إذا كانت بَتَّة التحكم 1، فإنها تغير البَتَّة الأخرى من 0 إلى 1، أو العكس. وإلا، لا تتغير البتات. وبالعامل بالكيوبتات، يمكن تركيب أي حوسبة من شبكة من بوابات الـ CNOT، إضافة إلى عملية واحدة أخرى هي ضرب الكيوبتات الفردية بطور عقدي. وهذه النتيجة تمثل تأكيداً آخر لحقيقة أن الحواسيب الكمومية الطوبولوجية تستطيع تنفيذ أي حوسبة كمومية.

تستطيع الحواسيب الكمومية تنفيذ مهام يُعتقد أن تنفيذها مستحيل بواسطة الحواسيب التقليدية. فهل من الممكن أن يكون الحاسوب الطوبولوجي أكثر مقدرة من الحاسوب الكمومي التقليدي؟ تُبين مُبرهنة أخرى، أثبتها «فريدمان» و«كتاييف» و«وانك» أن الأمر ليس كذلك. فقد أوضحوا أنه يمكن محاكاة عمل الحاسوب الكمومي الطوبولوجي، بكفاءة عالية وبأي دقة، بواسطة حاسوب كمومي عادي. وهذا يعني أن الحاسوب الكمومي الطوبولوجي يستطيع حوسبة كل شيء، يستطيع الحاسوب الكمومي الطوبولوجي حوسبته. إن هذه النتيجة توحى بنظرية عامة مفادها أن جميع النظم الحاسوبية، التي هي على درجة كافية من التطور والتي تستخدم موارد كمومية، تمتلك

(\*) Topological Errors

(1) البوابة المنطقية NOT.



لقد قدّر الباحثون الثلاثة أن معدل الخطأ في بوابة النفى التي اقترحوها يمكن أن يساوي  $10^{-30}$  أو أقل.

الكمومية الأخرى حتى الآن، هو ما يجعل الحوسبة الكمومية الطوبولوجية مغرية. أما التقانات اللازمة لصنع تجهيزات «هول» الكمومية الكسرية، فهي ناضجة أيضاً، إذ إنها هي نفسها تلك المستخدمة في صناعة الشبكات الميكروية. أما المثبتة<sup>(١)</sup> الوحيدة فهي أن هذه التجهيزات يجب أن تعمل عند درجات حرارة منخفضة جداً، من رتبة المليون كلفن، كي تبقى أشباه الجسيمات السحرية مستقرة.

إذا كانت الأنيونات اللاتبادلية موجودة فعلاً، فإن الحواسيب الكمومية الطوبولوجية سوف تتجاوز تصاميم الحاسوب الكمومي التقليدية في سباق الارتقاء من الكيوبتات والبوابات الفردية إلى آلات تامة النضج وجديرة بأن تسمى «حاسوباً». إن إجراء الحسابات بالعقد والضفائر الكمومية، وهو نهج بدأ وكأنه بديل طلسمي<sup>(٢)</sup>، يمكن أن يصبح الطريقة السائدة لتنفيذ حوسبة كمومية عملية خالية من الأخطاء.

Particles In, Answers Out (\*)

(١) substrate material، و substrate هي لوحة سيليكونية عادة يُرسب عليها شبه الموصل.

(٢) order of magnitude: إذا كان  $x$  أكبر من  $y$  بثلاث مراتب كبر، فإن هذا يعني أن  $x$  أكبر من  $y$  بألف مرة.

$x = 10^3 y$

catch (٣)

(٤) esoteric لا يفهمه إلا الخاصة. (التحرير)

## المؤلف

Graham P. Collins

كاتب في المجلة «ساينتفيك أمريكان» وعضو هيئة تحريرها. حصل على الدكتوراه في الفيزياء من الجامعة ستوني بروك. وهو يود شكر M. H. فريدمان - [مدير المشروع Q في الشركة مايكروسوفت] على إسهاماته في إعداد هذه المقالة.

## مراجع للاستزادة

Topologically Protected Qubits from a Possible Non-Abelian Fractional Quantum Hall State. Sankar Das Sarma, Michael Freedman and Chetan Nayak in *Physical Review Letters*, Vol. 94, pages 166802-1-166802-4; April 29, 2005.

Devices Based on the Fractional Quantum Hall Effect May Fulfill the Promise of Quantum Computing. Charles Day in *Physics Today*, Vol. 58, pages 21-24; October 2005.

Anyon There? David Lindley in *Physical Review Focus*, Vol. 16, Story 14; November 2, 2005. <http://focus.aps.org/story/v16/st14>

Topological Quantum Computation. John Preskill. Lecture notes available at [www.theory.caltech.edu/~preskill/ph219/topological.pdf](http://www.theory.caltech.edu/~preskill/ph219/topological.pdf)

Scientific American, April 2006

القدرات الحوسبية نفسها تماماً (كان >A. شُرش و >A. تورينك قد اقترحا أطروحة مماثلة في ثلاثينات القرن العشرين حول الحوسبة التقليدية).

## جسيمات داخلية، وإجابات خارجة

لقد تغاضيتُ حتى الآن عن سيوريتين حاسمتين لبناء حاسوب كمومي طوبولوجي عملي، هما إعطاء القيم الابتدائية للكيوبتات قبل بدء الحوسبة وقراءة الجواب في النهاية. تتضمن الخطوة الابتدائية توليد أزواج من أشباه الجسيمات، والمشكلة حينئذ هي معرفة نوع أشباه الجسيمات التي جرى توليدها. إن الإجراء الأساسي لتحقيق ذلك هو تمرير أنيونات اختبار حول الأزواج المولدة، ثم قياس الكيفية التي تغيرت بها أنيونات الاختبار في تلك السيورة، والتي تعتمد على نوع الأنيونات التي مرت بها (إذا تغير أنيون اختبار، فإنه لن يتفانى تماماً مع قرينه). بعدئذ تهمل أزواج الأنيونات التي ليست من النوع المطلوب.

وخطوة قراءة النتيجة تتضمن أيضاً قياس حالات أنيونية. وحينما تكون الأنيونات بعيدة بعضها عن بعض، يكون ذلك القياس مستحيلًا، ولذا يجب تجميع الأنيونات في أزواج بغية قياسها. وعلى وجه التقريب، يشبه هذا القياس التحقق من أن الأزواج تتفانى تماماً، على غرار الجسيمات المضادة الحقيقية، أو أنها تترك وراءها رواسب من الشحنة والسيالة flux، التي تكشف عن الكيفية التي تغيرت بها حالاتها بالضعف، انطلاقاً من علاقة الجسيم المضاد نفسها التي استهلأ بها حياتهما.

من ناحية أخرى، ليس صحيحاً أن الحاسوب الطوبولوجي منيع تماماً على الخطأ. ومصدر الخطأ الرئيسي فيه هو التفاوتات الحرارية في مادة الركيزة<sup>(٣)</sup> التي يمكن أن تولّد زوجاً إضافياً من الأنيونات، فينجد كل من الأنيونين مع ضفيرة الحوسبة، وفي النهاية يتفانيان ثانية [انظر الإطار في الصفحة 66]. لكن من حسن الطالع أن سيورة التوليد الحرارية تكبت عند درجة الحرارة المنخفضة التي يعمل عندها الحاسوب الطوبولوجي. يُضاف إلى ذلك أن احتمال حدوث تلك



الفضاء بغية التثبيت من صحة هذه التقانات المهمة أثناء الطيران.

## تحديات المستقبل<sup>(١)</sup>

إذا افترضنا أن الاختبارات الجارية أثناء الطيران على مركبة البليان العملي SED كانت ناجحة، فإن هناك الكثير من الأمور التي يجب القيام بها قبل أن يصبح بالإمكان تحقيق بعض التطبيقات، مثل الإطلاق السريع الاستجابة للأسلحة<sup>(٢)</sup> والطيران الطوافي<sup>(٣)</sup> فوق الصوتي المستدام والوصول إلى الفضاء بتكلفة مستطاعة.

يجب أن تكون محركات سكرامجت قادرة على العمل بأسلوب يمكن الوثوق به على مدى واسع من الأعداد الماخية. وكما ذكرت سابقاً، فإن التوربينات الغازية تعد فعالة بين 0 و 3 أو 4 ماخ، في حين يعتبر الصاروخ ضرورياً في مراحل من نظام سرعة الطيران تكون فيها السرعة أعلى من 15 ماخ تقريباً. ففي هذه السرعات العالية، تصبح محركات سكرامجت غير قادرة على تحمل التسخين الحراري على الارتفاعات التي يتطلبها ضغط كمية الهواء الكافية لحرق الوقود. لذا ينبغي للباحثين أن يبتكروا أنواعاً من محركات سكرامجت تستطيع تلبية حاجات التأقلم مع أكبر عدد ممكن من البيانات الملائمة لتغطية المدى الواقع بين 4 و 15 ماخ. وفي بعض التطبيقات، يجب أن يكون محرك سكرامجت متكامل كلياً مع دورة منخفضة السرعة مثل دورة التوربين الغازي. ويعني ذلك أن أنظمة السرعة التشغيلية لهذه المحركات يجب أن يتراكم بعضها فوق بعض للسماح بانتقال سلس فيما بينها. ويجب على المهندسين، أيضاً، أن يسعوا إلى منع الكتلة الزائدة لأنظمة الدفع المختلفة من أن تكون عبئاً إضافياً على أي مركبة متعددة المحركات في الوقت الذي تتحكم فيه بدقة في مدد نوبات عمل كل منها.

لا تستطيع المركبة X-51A، بتصميمها ذي الشكل الهندسي الثابت، أن تخفض تخفيضاً جوهرياً حدّها التشغيلي. وسوف تكون الهندسة الداخلية المتغيرة لمحرك سكرامجت ضرورية للسماح له بالعمل في أعداد ماخية أدنى من 4 ماخ. ومع أن سلاح الجو الأمريكي والوكالة ناسا ليسا طرفاً في الجهود المبذولة ضمن البرنامج SED، فإنهما عرضا في أحد محركات هايتك نموذجاً أولياً لمنفذ دخول ذي شكل هندسي متغير، تكون الجنيحات المتحركة فيه قادرة على تغيير أشكالها الانسيابية.

ويمكن لتقانة الوقود أن تحد أيضاً من فائدة محرك سكرامجت في كل من طرفي الغلاف التشغيلي الحالي. فقد صممت المركبة X-51A بحيث لا تعمل إلا بعد حصول تسخين بنيوي كاف لتحويل الوقود JP-7 إلى حالته الغازية. وفيما يتعلق بالسرعات الماخية التي هي أكثر انخفاضاً، فقد يكون المطلوب أن تعمل غرف احتراق الجيل القادم من محركات سكرامجت مدة وجيزة، باستخدام الوقود السائل أو مادة داسرة تشمل الطورين السائل والغازي معاً، قبل أن تتحول إلى العمل باستخدام وقود غازي كلياً في المرحلة اللاحقة من الطيران. والمعروف أن السوائل أكثر كثافة 1000 مرة من الغازات، وهذا يقتضي ضرورة أن تنفذ مهمة تزويد محرك سكرامجت بالوقود والحفاظ على احتراق ودفع مستقرين خلال مرحلة الانتقال من المادة الداسرة السائلة إلى الوقود الغازي الصرف، بمستوى عالٍ من البراعة. غير أن البرهان على هذه الإمكانية قد تم من خلال فحوص المكونات التي أجريت في سياق الجهود البحثية المتعلقة بمحرك هايتك. أما في الطرف الآخر من الغلاف، حيث تكون السرعة عالية، فقد تبين أن السعة الحرارية لوقود

الطيران النفاث، وحتى لأنواعه التي يكون تفكيكها مصحوباً بامتصاص للحرارة، مثل الوقود JP-7، سوف تتدنى كلما اقتربت السرعة من 8 ماخ. لذلك فإن الطيران بسرعة أكبر سوف يتطلب أنواعاً مختلفة جداً من الوقود ومواد متطورة مقاومة للحرارة - أو ربما استخدام مادة الهيدروجين على الرغم من اللوجستيات المصاحبة والتحديات التي تفرضها طرق تعبئته في المركبة.

لقد كان التركيز الأولي في برنامج هايتك منصّباً على مركبات بحجم الصاروخ وتطلق من الطائرات. أما في التطبيقات الأخرى، مثل الطيران الطوافي فوق الصوتي المستدام والوصول إلى الفضاء، فقد برزت الحاجة إلى مركبات أكبر بكثير. ولإزالة البرنامج، اللذان بدئ العمل بهما عام 2003، وهما البرنامج فالكون التابع للوكالة DARPA، والبرنامج Robust Scramjet التابع لسلاح الجو الأمريكي، يكافحان لحل القضايا المتعلقة بالمحركات التي هي أكبر حجماً، وبقدرة الدفع الهوائي، التي تفوق 100 مرة قدرات التجهيزات الحالية للمحرك هايتك.

لقد حققت الجهود الأخيرة، المبذولة في تطوير تقانة محرك سكرامجت، تقدماً عظيماً في التغلب على عقبات كأداء واجهت تحقيق طيران مستدام عالي السرعة، ونحن نأمل في أن يؤدي هذا التطور المستمر إلى التقدم ببطء، إن لم يكن بخطوات واسعة، كي نتوصل في المستقبل، غير البعيد جداً، إلى تحقيق شيء يشبه محرك الطائرة المتصالبة الجناحين التي نراها في أفلام «حرب النجوم».

Future Challenges (\*)

hypersonic cruise (٢)

rapid-response weapons delivery (١)

## المؤلف

Thomas A. Jackson

هو نائب رئيس شعبة العلوم في قسم الدفع الفضائي بمديرية الدفع في مختبر الأبحاث التابع لسلاح الجو الأمريكي بأوهايو، حيث يعمل على تحديد وجهة الدراسات العلمية في التقانة المتقدمة لمحركات الدفع التي تعمل بضغط الهواء. وقد حصل على الدكتوراه في الهندسة الميكانيكية من جامعة كاليفورنيا في إيريافين عام 1985، وعلى الماجستير في إدارة التقانة من قسم الإدارة في كلية سلون التابعة لمعهد ماساتشوستس للتقانة MIT. وأنصبت أبحاثه، في المقام الأول، على تقانات الاحتراق وحرق الوقود في محركات الدفع.

## مراجع للاستزادة

Ramjets. Edited by Gordon L. Dugger. American Institute of Aeronautics and Astronautics Selected Reprint Series, 1969.

A Procedure for Optimizing the Design of Scramjet Engines. P. J. Waltrup, F. S. Billig and R. D. Stockbridge in *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 16, No. 3, pages 163-171; May-June 1979.

Research on Supersonic Combustion. F. S. Billig in *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 4, pages 499-514; July-August 1993.

Hypersonic Airbreathing Propulsion. William H. Heiser, David T. Pratt, Daniel H. Daley and Unmeel B. Mehta. American Institute of Aeronautics and Astronautics Education Series, 1994.

Investigation of Scramjet Injection Strategies for High Mach Number Flows. D. W. Riggins, C. R. McClinton, R. C. Rogers and R. D. Bittner in *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 11, No. 3, pages 409-418; May-June 1995.

Scientific American, August 2006



# معرفة عملية

## تطبيقات متزايدة

### الاستنتات الوعائية<sup>(١)</sup>

لقد انتشر زرع الاستنتات<sup>(٢)</sup> (الوشائع) مؤخراً انتشاراً واسعاً والاستنتات هي أسطوانات معدنية دقيقة مخلخلة تستخدم لتوسيع الشرايين المريضة المتضيقية) مما دفع بعض الأطباء إلى القول بأن ثمة إفراطاً اليوم في إجراء عملية زرع الاستنتات... لكن المدافعين عنها يقولون إن هذه الاستنتات ما فتئت في تطور مستمر منذ عشرين سنة، وإنها أصبحت تمثل خياراً مهماً بدلاً عن عمليات القلب المفتوح، فطوال عقود مضت كان مرضى الشرايين الإكليلية، الذين تضيق شرايينهم بفعل توضع ترسبات شحمية (عصائد شريانية)، بحاجة إلى أن تجري عليهم عمليات قلبية يستخدم فيها جزء من شريان أو وريد من المريض نفسه كمجارية<sup>(٣)</sup> وعائية لتخطي هذه التضيقات. وكذلك كان الجراحون يجرون عمليات مشابهة على المصابين بانسدادات شريانية في نواح أخرى من الجسم، أو كانوا يفتحون الشريان المغلق لتنظيفه من الترسبات، لكن عندما بدأ راب الأوعية angioplasty وتوسيع الشرايين المريضة بالبالون، قل احتياج مرضى الشرايين إلى عمليات القلب المفتوح؛ فالبالون يُدخل بالتخدير الموضعي بواسطة قِطْطَار<sup>(٤)</sup> catheter رفيع في الشريان، ويُدفع إلى مكان الإصابة، حيث يُنفخ ليضغط على العصيدة ويحطمها فيفتح بذلك المجرى المتضيق ويسمح للدم بالجريان... ومع ذلك فكثيراً ما كان الشريان يعود للتضيق بحد فعل منعكس من جدار الشريان، أو نتيجة نمو نسيج ليفي ارتكاسي فيه.

وأما عملية زرع الاستنت الشرياني فهي عملية شبيهة بعملية التوسيع بالبالون، إنما تهدف إلى الإبقاء على الشريان مفتوحاً [انظر الشكل في الصفحة المقابلة]. وأهم الشرايين المستهدفة في هذه العملية بلا شك هي شرايين القلب الإكليلية التي تغذي العضلة القلبية؛ لكن الشرايين الأخرى صارت أيضاً تعالج بهذه الطريقة بشكل متزايد. وقد كانت الاستنتات الأولى (التي رُخصت للاستعمال في بواكير التسعينات) مصنوعة من الفولاذ الذي لا يصدأ، ثم ظهرت الاستنتات التي تتوسع ذاتياً والمصنوعة من خليطة معدني النيكل والتيتانيوم، تلك الخليطة التي لها خاصية الاحتفاظ على أي تبدل في الشكل. أخيراً رُخص في الولايات المتحدة عام 2003 للاستنتات المغطاة بمركبات (بوليميرات) تسمح بتحرير تدريجي لأدوية ممانعة لنمو النسيج [ذلك النمو المسؤول عن نكس التضيقات الشريانية]، مما روج كثيراً لاستخدام الاستنتات.

ويقول الناقدون إن الأطباء يستخفون بالآخطار المحتملة لهذه الاستنتات ويتعجلون في إدخالها إلى شرايين المرضى. لكن مدير مركز الأوعية في مستشفى ماساتشوستس العام في بوسطن >M. جاف< يقول: «لقد حققت الاستنتات ثورة في العناية بالمرضى». فبعد أن كان نحو 30% من المرضى الذين عولجوا بالاستنتات العادية يتعرضون لنكس في تضيق شرايينهم، هبطت هذه النسبة إلى أقل من 10% عندما استخدمت الوشائع الدوائية. ويلحظ >جاف< أن هناك براهين علمية ودراسات مكثفة تثبت أن الاستنتات الإكليلية المحررة للأدوية drug-eluting هي الأنجع في معالجة التضيقات الإكليلية. أما

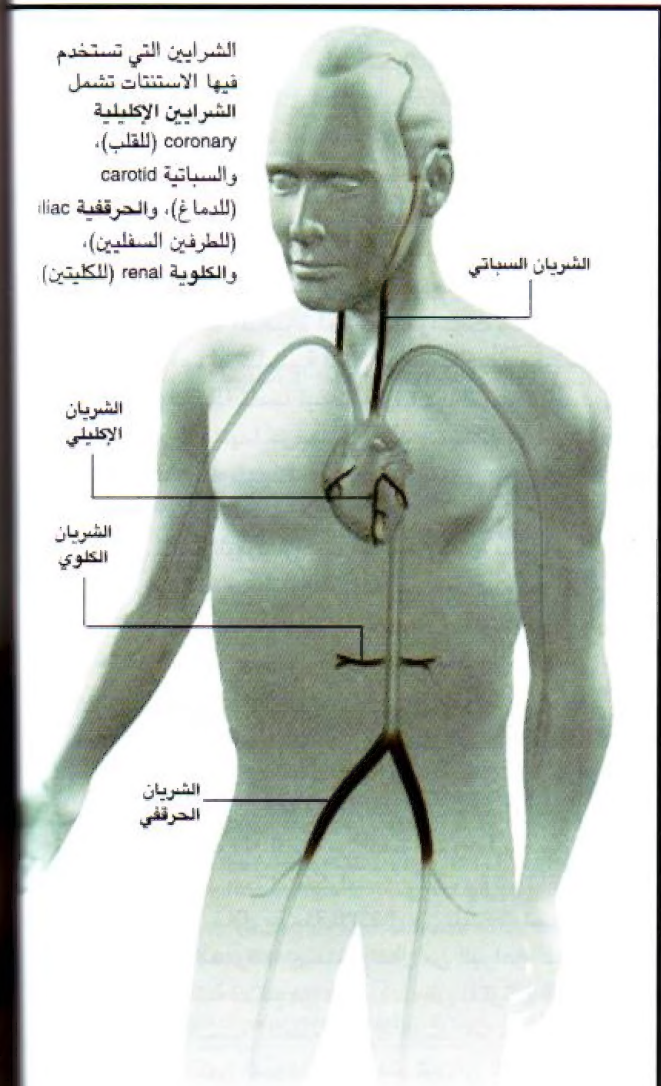
#### VASCULAR STENTS (١)

(١) ج: استنت (أو وشيعة): تعريب للمصطلح stent الذي ينسب إلى طبيب الأسنان الإنكليزي Charles Stent (1807 - 1885) الذي اكتشف مادة صلبة تتلين بالحرارة وتستعيد صلابتها بالبرودة، وتستخدم في طب الأسنان لإجراء الطبعات وفي الجراحة لتثبيت الطعوم.

#### bypass (٢)

(٢) أداة على شكل أنبوب أجوف تستخدم لإدخالها في القنوات أو الأوعية الدموية لحقن أو سحب السوائل... وتسمى عملية استخدامها قِطْطَارَة (أو قسطرة).

popliteal artery (٣) superficial femoral artery (٤)





الذين تجرى عليهم عملية التوسيع، أدوية تمنع صفيحات الدم من التجلط وتشكيل الخثرات لفترة شهر إلى سنة، إضافة إلى الأسبرين الذي هو عماد المعالجة الدوائية المضادة للصفائح.

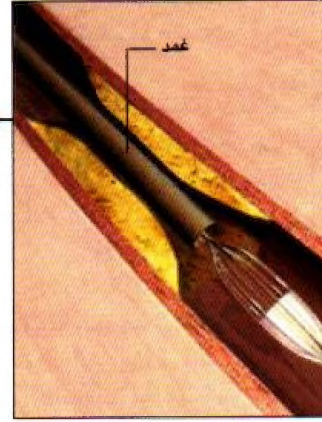
■ **مقاس واحد لا يصلح لجميع المرضى:** يُحدد الاستنت بحجم الشريان المعالج، الذي يقدر أولاً بالأشعة ثم أثناء عملية التوسيع ذاتها. ومعظم الشرايين الإكليلية تراوح أقطارها ما بين 2 و 4 مم، في حين تراوح أقطار الشرايين السباتية ما بين 4 و 6 مم. وتفضل الاستنتات التي توسع بالبالون في عمليات توسيع الشرايين الإكليلية، لأن حجمها في النهاية يحدده حجم البالون المستعمل. أما بالنسبة إلى الشرايين السباتية فتفضل الاستنتات التي تتوسع من ذاتها لأنها مقاومة للضغط. وكما هو معروف تقع الشرايين السباتية قريباً من جلد العنق، فإذا استخدمت فيها الاستنتات العادية كانت معرضة للتضييق إذا أصابها أي ضغط خارجي.

■ **التقاط فتات العصيدة:** إن التوسيع بالاستنتات يحطم العصيدة الشريانية، مما يطلق كسرات bits من مخلفات هذا الحطام. وتتحمل معظم أعضاء الجسم انطلاق هذه الكسرات من المخلفات العصيدية من دون آثار جانبية تذكر، وذلك على حد قول د. نيلسون هويكنز [رئيس قسم الجراحة العصيدية بجامعة ولاية نيويورك]. إلا أن هذه المخلفات قد تتسبب في حدوث سكتة دماغية إذا توضع في شريان يتفرع إلى الدماغ. لذلك اخترعت عدة شركات أدوات ترشيح خاصة لالتقاط هذه الكسرات العصيدية في حالات توسيع أحد الشرايين السباتية بالاستنت (انظر الشكل في الأسفل). وفي بعض الحالات الأخرى يستخدم البالون لإغلاق مجرى الدم في الشريان خلال عملية التوسيع، ثم تقوم قناطر خاصة بشطف مخلفات التوسيع قبل «تفريغ» البالون وإعادة جريان الدم الطبيعي.

■ **لمنع التخثر:** قد تتشكل الخثرات الدموية blood clots في أي مكان تجرى فيه عملية داخل الشريان أو حول أي أداة تزرع ضمنه؛ لذلك توصف للمرضى



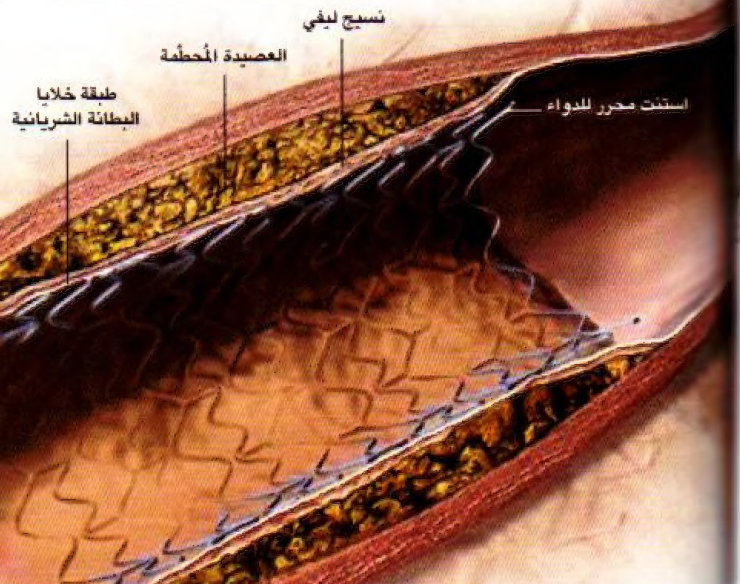
إن الاستنتات القابلة للتوسع بالبالون، والتي تستعمل عادة لتوسيع الشرايين الإكليلية، تُجمع على البالون وتدفع بقنطار إلى موضع الشريان المتضيق. وينفخ البالون (ربما عدداً من المرات) ليفتح الاستنت ويحطم العصيدة الشريانية ويضغطها على جدار الشريان. بعد ذلك يُفْرغ البالون ويسحب بالقنطار.



تستخدم الاستنتات القابلة للتوسع الذاتي في معظم عمليات توسيع الشرايين السباتية carotid. يُدفع الاستنت داخل غمد sheath ضيق. فإذا سحب الغمد توسع الاستنت ذاتياً. ويمكن أن يستخدم بالون فيما بعد لزيادة تثبيت العصيدة plaque والاستنت. كذلك يمكن أن تستخدم «مفلة» ترشيح خلال عملية التوسيع لالتقاط الكسرات التي قد تنفصل عن العصيدة وتغلق أحد شرايين الدماغ، مسببة السكتة الدماغية.

تولد العصيدة الشريانية المحطمة<sup>(١)</sup> ردود فعل نسيجية التامة قد تؤدي إلى تضيق المجرى (لمعة الشريان)، ويعالج هذا الأمر باستعمال الاستنت المحررة للأدوية المغطاة ببوليمير polymer قادر على تحرير مواد على مدى عدة أسابيع يمنع تشكل طبقات جديدة من النسيج الليفي. لكنه يسمح بنمو خلايا البطانة الشريانية التي عادة ما تبطن الوعاء. وفي آخر الأمر، تغطي الخلايا دعائم الاستنت مما يقلل احتمال تجمع الصفائح عليها وتتشكل الخثرات المانعة.

one size does not fit all (٣)  
plaque catcher (١)  
coated (٢)





## التهابات الجسم<sup>(\*)</sup>

إن معرفة كيف يمكن للنيكوتين أن يوقف الالتهاب قد تساعد على ابتكار أدوية جديدة.



النيكوتين مضاد التهاب فعال وقوي، لكنه شديد الخطورة إلى درجة تمنع استعماله في العلاج.

وينشطها، ما يسمح بالتخاطب المتبادل بين الدماغ والجملّة المناعية.

«لقد بات هذا الأمرُ ظاهراً تماماً»، كان ذلك تعليق <W> دي جونك< من المركز الطبي الأكاديمي في أمستردام، الذي درس كيفية استجابة البلاعم (الخلايا البالغة) للأستيل كولين<]. وقد أبدى ملاحظته بقوله: «يبدو أن المدخنين الذين يعانون التهاب القولون القرحي يستفيدون من ممارستهم عادة التدخين، ومنه يمكن ملاحظة أن النيكوتين يُطَفِّئ الأمراض الالتهابية، ولكن لا يستطيع أحد التعامل مع ذلك الموضوع تماماً».

ويمكن أن يكون فريق <ألو> قد قدم تفسيراً في الوقت الحاضر للتأثيرات الإيجابية المستفادّة من النيكوتين في بعض الأمراض المتنوعة، مثل الفصام وداء الزايمر وداء باركنسون ومتلازمة توريت والتهاب القولون القرحي. وفي التجارب المختبرية، أظهر <ألو> أن النيكوتين يرتبط بالمستقبلات الخاصة به الموجودة على سطح الخلايا البالغة ويمنعها من قذف السيبتوكينات الالتهابية، ويعتبر هذا القمعُ فعالاً جداً. كما حدّد الباحثون مستقبلات نوعية فرعية تسمى مستقبلات الأستيل كولين ألفا 7، التي يرتبط بها النيكوتين في البلاعم لإيقاف إنتاج السيبتوكينات.

ويبقى الحديث عن أن يكون النيكوتين دواءً أمراً غير معقول نتيجة سمّيته. وبغض النظر عن طبيعته التي قد تسبب الإدمان، فإنه قد يسبب مشكلات وعائية قلبية، كما يسهم في حدوث السرطان؛ ولذلك يقول <ألو>: «لا يوجد أحد يتطلع إلى استخدام النيكوتين لمعالجة الالتهاب.. ونحن نريد تصميم مركبات نوعية نموذجية تستهدف هذه المستقبلات لتعطي الفوائد التي يحققها النيكوتين من الفعالية المضادة للالتهاب، مع التخلص في الوقت ذاته من سمّيته كتأثير جانبي له».

«هذه إحدى القصص أو المآثر العظيمة في علم المناعة التي جرت في السنوات القليلة الماضية، ولا يوجد سؤال حول ذلك»، هكذا قال خبير الرعاية الطبية الفائقة في جامعة بتسبورج <M> فينك. وقد تكون المعالجة بمركب انتقائي يشبه النيكوتين المعالجة الواعدة، ليس فقط ضد الإنتان بل ضد الأمراض المزمنة البطيئة، بما في ذلك أمراض القلب والسرطان والسكري. وإن المهمة المطروحة بين أيدينا هي إيجاد أفضل بديل للنيكوتين، وتبقى أطباق بتري المَعُول عليها في رصد ذلك الهدف، حسب تعبير <ألو>.

ح. ميلتون، مقيمة في لندن

أصبحت صورة النيكوتين قَيِّدَ التعديل والتغيير على الأقل من وجهة النظر الطبية البيولوجية، فقد وجد الباحثون أن هذه المادة يمكنها أن تُطَفِّئ أعراض بعض الأمراض كداء الزايمر والتهاب القولون القرحي. وعلى أية حال فقد بقيت كيفية مقاومة النيكوتين لهذه الأمراض غير واضحة، ولكن في الوقت الحاضر وبعد دراسة الإنتانات أظهر <ألو> [من مستشفيات جامعة الشاطئ الشمالي في منهاسيت، نيويورك] بالأدلة أن السبل الكيميائية البيولوجية للنيكوتين يمكنها أن تؤدي إلى إنتاج المزيد من الأدوية القوية المضادة للالتهاب.

إن الإنتان الدموي أكثر حالات الالتهاب إماتة، وهو غزو بكتيري للدم، وهو السبب الثالث من أسباب الوفاة في العالم المتقدم، ويعتبر مسؤولاً عن 10% من الوفيات في الولايات المتحدة سنوياً. وتسبب العدوى جزءاً من التخريب النسيجي، إلا أن الذي يجعل المصابين في حالة خطرة هو النمط العنيف لاستجابتهم المناعية.

تنتج البلاعم كميات كبيرة من طلائع الالتهاب التي تسمى السيبتوكينات cytokines، وتؤدي هذه الاستجابة المناعية المتفارقة إلى تخريب النسيج. وفي النهاية كثيراً ما يموت المريض بسبب الخلل الوظيفي القلبي الوعائي وفشل وظيفي يصيب عدة أعضاء.

لقد وجد <ألو> ومساعدوه شيئاً متميزاً: يمكن للنيكوتين أن يمنع هذه الاستجابة الالتهابية المفرطة إلى درجة تراجع حالة الإنتان لدى الفئران. وبأقصى ما يمكن من استمرارية مضادات الالتهاب فإن هذه المادة تعتبر قوية. وفي مؤتمر مؤسسة نوفارتس المنعقد بلندن في الشهر 2 صرّح <ألو> قائلاً: «إن النيكوتين ينقر على وتر الآليات المضادة للالتهاب الخاصة بالجسم ذاته. وهذا من جماليات أسلوبنا، فباستعمال النيكوتين نقوم بتكرار الآليات الفيزيولوجية المنتقاة بالتطور لتعديل نظام الجهاز المناعي».

يحاكي النيكوتين بشكل خاص عمل الأستيل كولين، الذي يعتبر بمثابة سندريلا الناقلات العصبية، فلقد تم تجاهل دوره بشكل كبير خلال سنوات، ثم لمع نجمه بدور البطولة، حيث تبين أنه يربط الأعصاب بالجملّة المناعية. وتسيطر الجملّة العصبية على شدة الالتهاب التي تحصد خلايا أجسامنا بواسطة مادة الأستيل كولين. ولا توجد مستقبلات الأستيل كولين في نهايات الخلايا العصبية وحدها، بل توجد أيضاً على سطح الخلايا المناعية. ويربط الأستيل كولين بين هذه المستقبلات

### لمحة عن النيكوتين<sup>(\*\*)</sup>

يمكن للنيكوتين في عمله كمضاد التهاب فعال أن يثبط استجابة مناعية خطيرة، لكنه خطر جداً باستخدامه في العلاج. ولحسن الحظ يمكن أن يوجد له بدائل، وقد طوّرت شركات صيدلانية أدوية مشابهة للنيكوتين مثل GTS-21 الذي صُنّف لتنشيط مستقبلات الأستيل كولين ألفا 7 في أدمغة المصابين بداء الزايمر، لكن التجارب السريرية فشلت في إظهار فائدة واضحة لهذه الأدوية، ولذلك سُحبت. وربما لم تكن هذه المركبات قادرة على عبور الحائل (الحاجز) الدموي الدماغي، وهو الأمر الذي سيعتبر ميزة لها كونها مركبات مضادة للالتهاب، إذ يمكن عندها استهداف النسيج المحيطة بالدماغ مع تجنب الدماغ بذاته. ولقد بدأ الباحثون باختبار مثل هذه البدائل لمقاومة الالتهاب.

BODY BLAZES (\*)  
A Nick of Nicotine (\*\*)